بسم الله الرحمن الرحيم

www.fppt.info

میکرو سیلیس و کاربرد آن در بتن

داود مستوفی نژاد

استاد دانشگاه صنعتی اصفهان

عضو کمیته اجرایی آیین نامه بتن ایران و مبحث نهم مقررات ملی ساختمان

سمینار انجمن بتن اصفهان (با همکاری شرکت فرو آلیاژ) - مرداد ۹۷

www.fppt.info

فهرست مطالب

۱- مقدمه

۲- معرفی میکرو سیلیس

۳- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی میکرو سیلیس

۴- استفاده از میکرو سیلیس در بتن

۵- کاربردهای میکرو سیلیس در عمل

۶- آیین نامه های مرتبط با میکرو سیلیس

www.fppt.info

مقدمه

- **پوزولان و سیمان پوزولانی**
  - مصالح شامل سیلیس فعال یا سیلیکات‌های فعال که به صورت طبیعی یا مصنوعی وجود دارند و خصوصیت سیمانی قابل توجه (به صورت ثانویه) از خود نشان می‌دهند.

الف) طبیعی :

۱- مثل خاکستر آتشفشانی. (Volcanic Ash در ایران بسیار زیاد است و در فاز شیشه ای، سرد شده و Amorph است)

۲- شیل ها و چرت های اُپالینی

۳- خاک دیاتومه‌ای کلسینه شده

- **متداول ترین پوزولان های طبیعی در عمل، مواد عمل آوری شده و کلسینه شده هستند؛ از جمله: رس های کلسینه شده، شیل های کلسینه شده، و نیز متا کائولین که از کلسینه کردن رس کائولین با خلوص بالا و سرد کردن سریع، به صورت آلومینو سیلیکات آمورف تبدیل می شود.**

- پوزولان و سیمان پوزولانی

ب) مصنوعی

۱) خاکستر بادی (Fly Ash)؛ (خاکستر نرم شدهٔ سوخت: PFA)

- محصول فرعی نیروگاه تولید برقی است که از سوخت ذغال سنگ استفاده می‌کند.
- به روش الکتریسیته ساکن از دودکش نیروگاه جمع آوری می شود. دارای سیلیس فعال بوده و خاصیت سیمانی دارد. نرمی آن در حد سیمان است.

۲) میکرو سیلیس (Micro silica)؛ (دودهٔ سیلیسی: Silica Fume)

- محصول فرعی کارخانجات فولاد آلیاژی یا فرّو سیلیس است.
- نتیجهٔ تبدیل کوارتز با خلوص بالا به کمک ذغال سنگ به سیلیکون در یک کورهٔ قوس الکتریکی است که به صورت بخار سیلیسی کوره در دمای ۲۰۰۰ درجه از آن خارج می شود.

2- تعاریف میکروسیلیس

- نام گذاری متفاوت میکروسیلیس

❖ Silica fume

❖ Condensed silica fume

❖ Microsilica

❖ Silica dust

تعریف میکروسیلیس

ACI 116-R غیر کریستالی

ذرات سیلیسی ریز و Silica fume هستند که محصول جانبی کوره‌های دوار الکتریکی بوده و از عنصر پایه‌ی سیلیسیم یا آلیاژهای حاوی سیلیسیم تولید می‌شود.

2- معرفی میکروسیلیس

- میکروسیلیس به عنوان یک ماده‌ی افزودنی سیمانی طبقه بندی می‌شود.

ویژگی‌های مواد افزودنی سیمانی:

- رفتار سیمان پوزولانی در اختلاط با آب
- کیورینگ مرطوب
- مقاومت کنترل
- سنگ آهک خاکستر بادی ها

ground granulated blast-furnace slag

silica fume

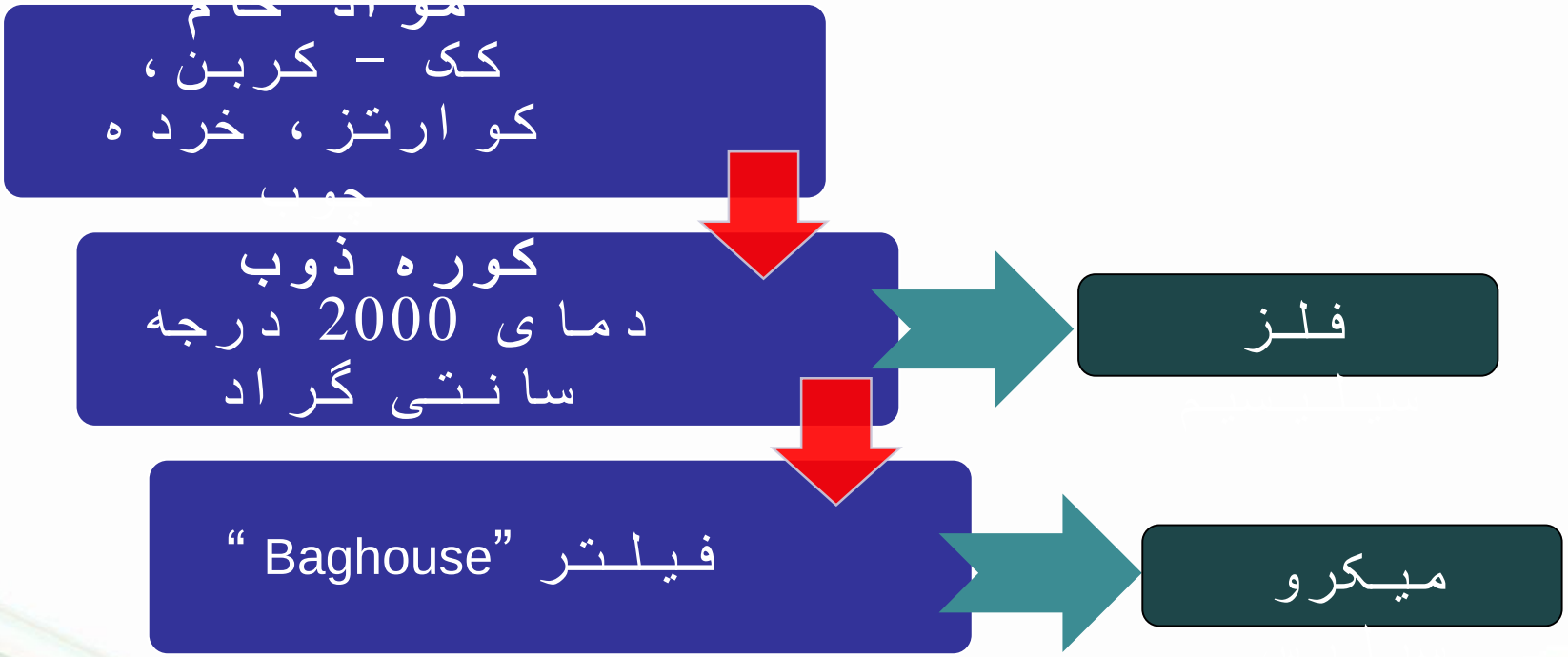
ASTM C 1240, Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures,

ASTM C 989, Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for use in Concrete and Mortars

2 معرفی میکرو سیلیس

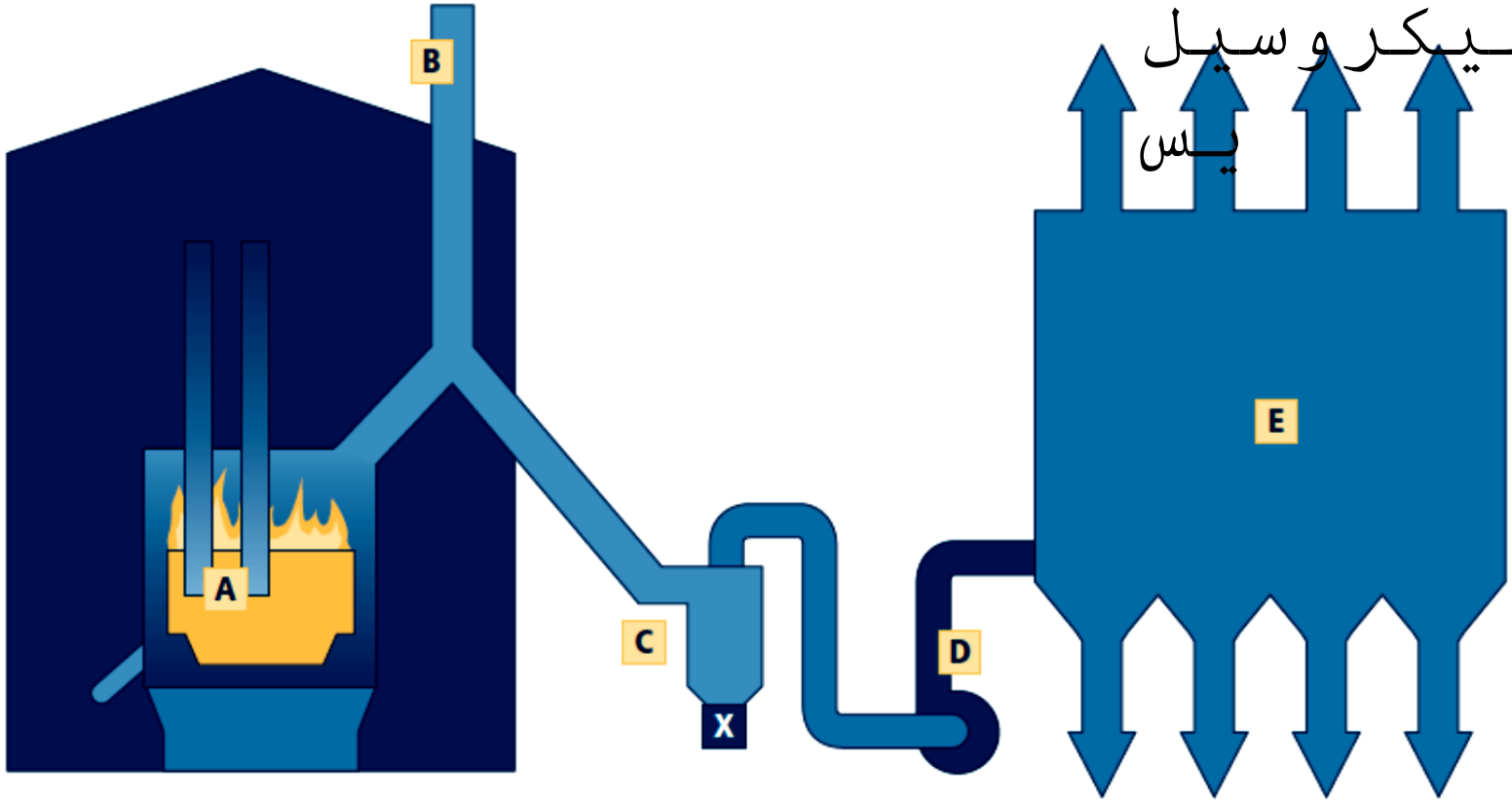
2 معرفی میکروسیلیس

- تولید میکروسیلیس



۱- معرفی میکروسیلیس

- تولید میکروسیلیس



A	Open furnace	B	Stack	C	Precollector	D	Fan	E	Baghouse filter

Silica Fume Colors

۳- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی میکروسیلیس

- **ویژگی‌های شیمیایی میکروسیلیس**

بی شکل (Amorphous)

میکروسیلیس ماده‌ای کریستالی نیست. مواد کریستالی در آب حل نمی‌شوند.

به عنوان مثال، ماسهٔ سیلیسی ماده‌ی کریستالی موجود در بتن است.

۳- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی میکرو سیلیس

❖ ویژگی‌های شیمیایی میکروسیلیس

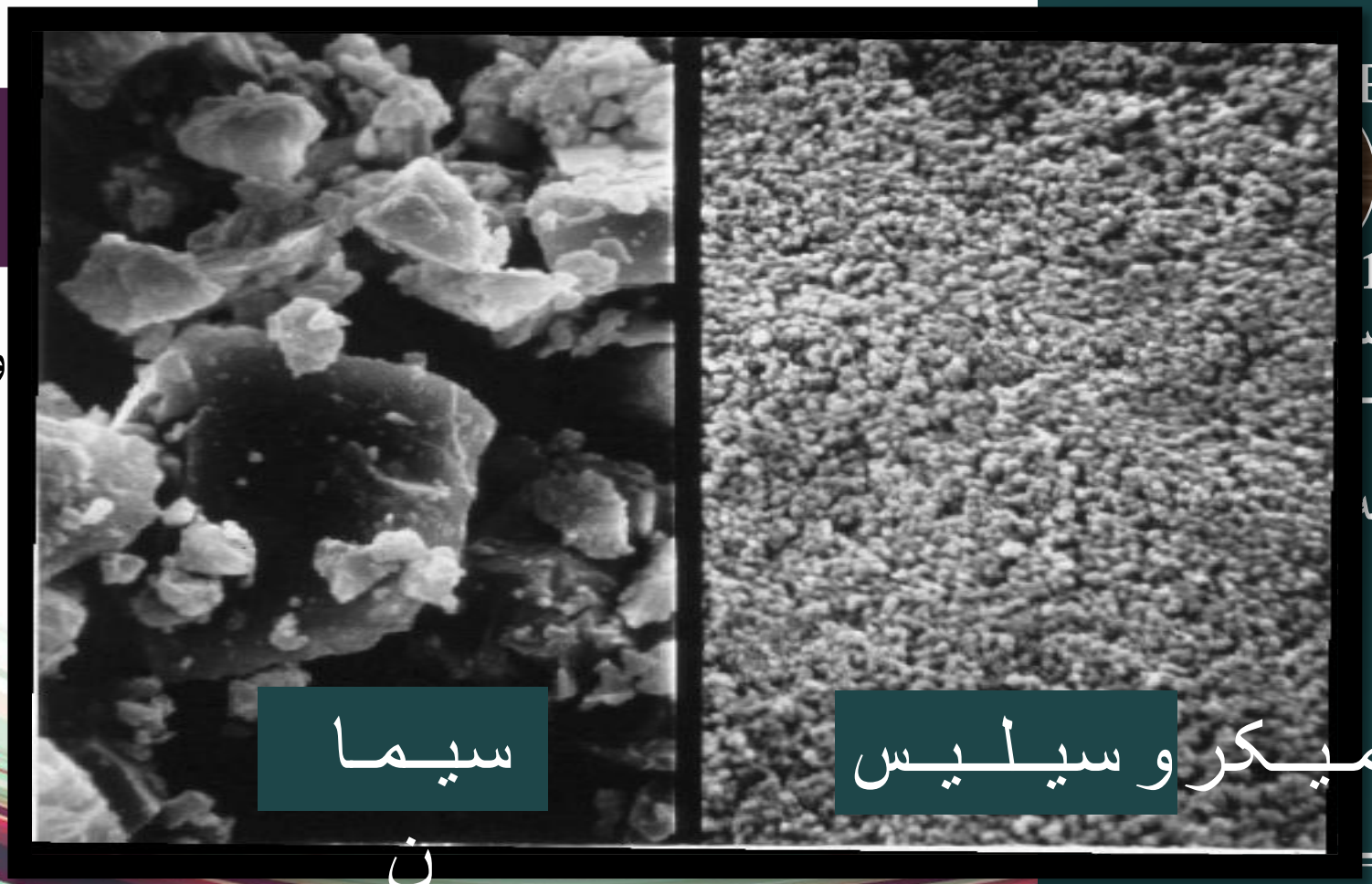
Silicon dioxide > 85%

به دلیل وجود مقادیر فراوان این ماده، میکروسیلیس مادهیِ پوزولانیِ بسیار واکنش پذیری است. با شروع واکنش‌های شیمیایی در سیمان، کلسیم هیدروکسید تولید می‌شود که میکروسیلیس با واکنش با این محصول به تولید کلسیم سیلیکات هیدراته می‌پردازد.

سوپر پوزولان!

۳- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی میکرو سیلیس

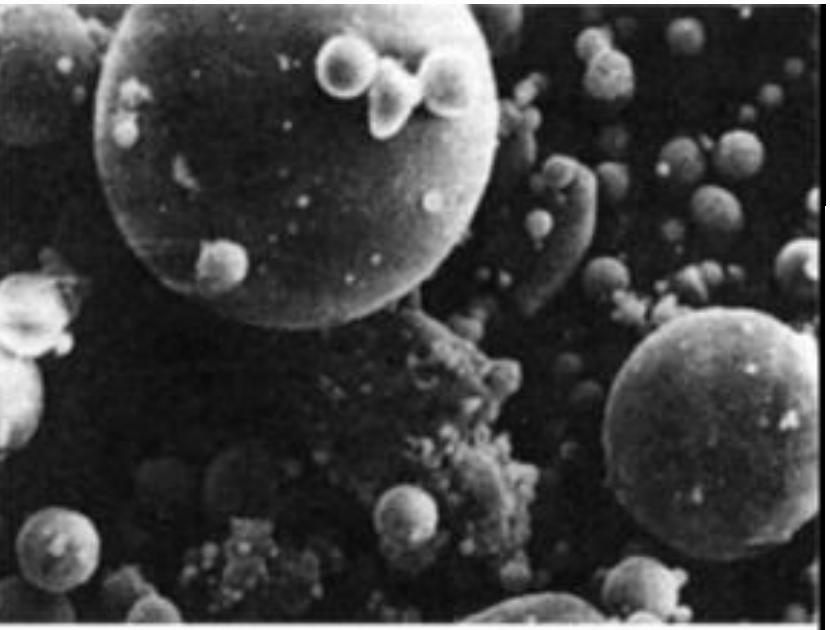
ی ها ی فیزیکی میکرو سیلیس

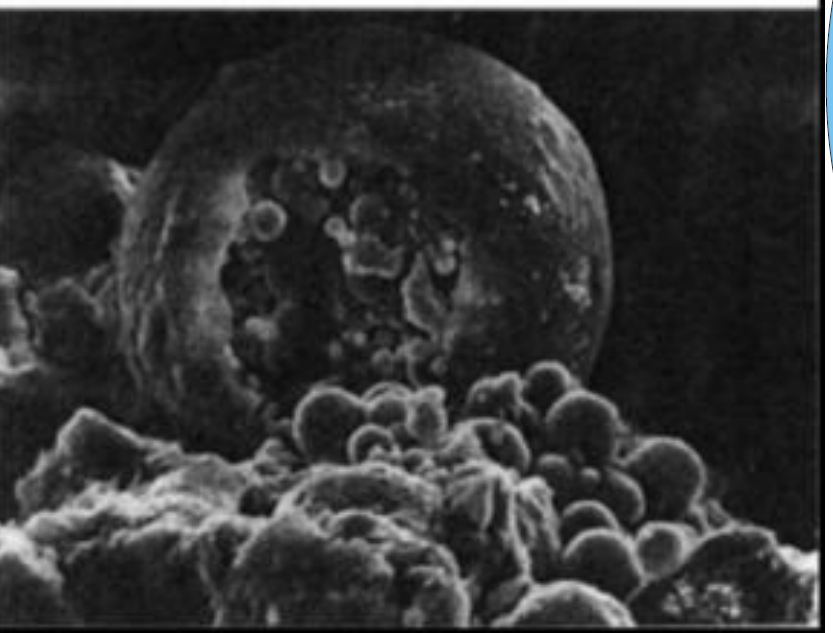


R

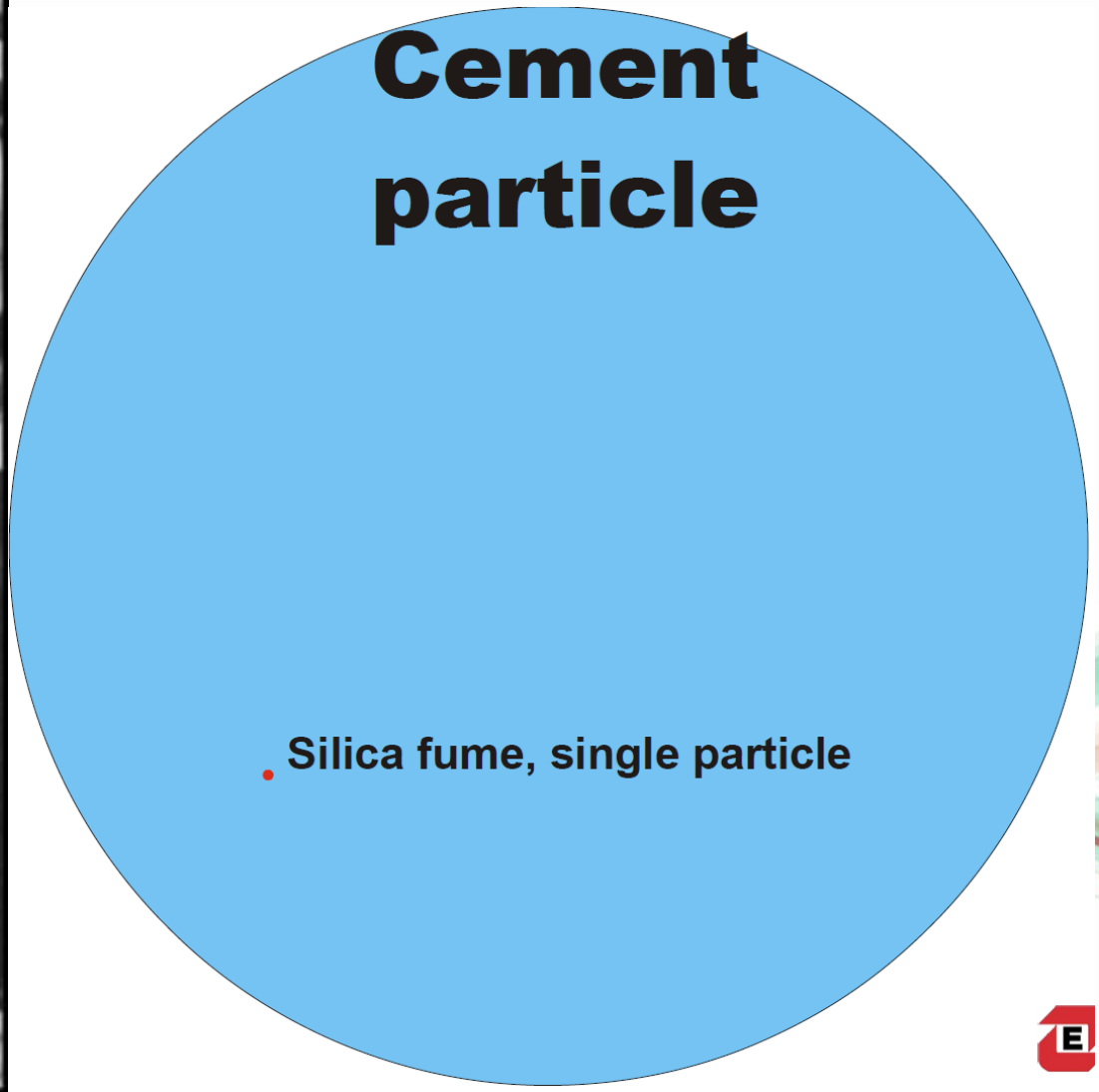
بـ
15
س
مـ
بـ
یـک
د و
مـ
وجود د ارد

۳- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی میکرو سیلیس

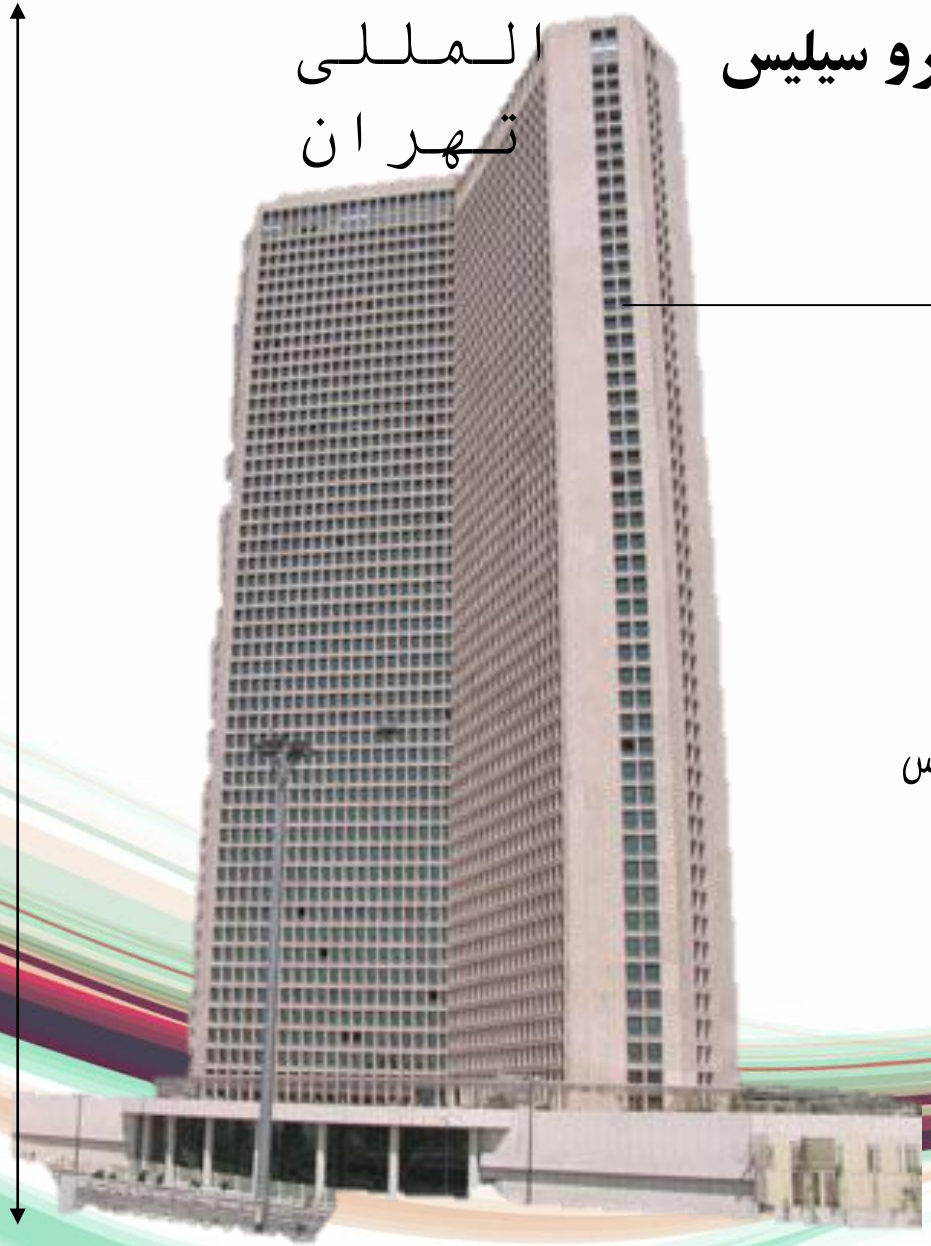




❖ اندازهٔ ذرات

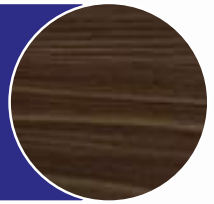


❖ **مقایسه‌ی اندازه‌ی سیمان و میکرو سیلیس**



۳- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی میکرو سیلیس

❖ ویژگی‌های فیزیکی میکروسیلیس



چگالی تودهای (Bulk density)

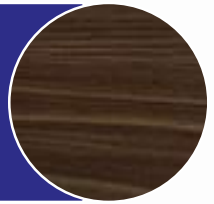
بستگی به فلزات موجود در کوره و نحوه‌ی عمل‌کرد کوره دارد. به دلیل چگالی توده‌ای بسیار پایین برای حمل به مقاصد دور صرفهٔ اقتصادی ندارد.

(as-produced): 130 to 430 kg/m^3

(densified): 480 to 720 kg/m^3

۳- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی میکرو سیلیس

❖ **ویژگی‌های فیزیکی میکروسیلیس**



چگالی ویژه (Specific gravity)

عددی نسبی است که میزان چگالی میکروسیلیس نسبت به آب را بیان می کند.

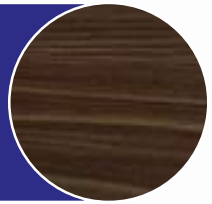
چگالی ویژه میکرو سیلیس = ۲/۲

چگالی ویژه سیمان = ۳/۱۵

۳- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی میکرو سیلیس

❖ ویژگی‌های فیزیکی میکروسیلیس

سطح مشخصه (Specific surface)



جمع تمامی مساحت سطوح ذرات است و این عدد برای میکرو سیلیس بسیار زیاد است. همان طور که ماسه در مخلوط بتن موجب بالا رفتن تقاضای آب می شود در مورد میکروسیلیس نیز همین گونه است.

Cement: **Specific surface: 300 to 500** m^2/kg

Microsilica: **Specific surface: 15,000 to 30,000** m^2/kg

نرم تر از دود سیگار!

۳- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی میکرو سیلیس

❖ **نقش فیلتراسیون در کارخانهٔ فرّو آلیاژ!**

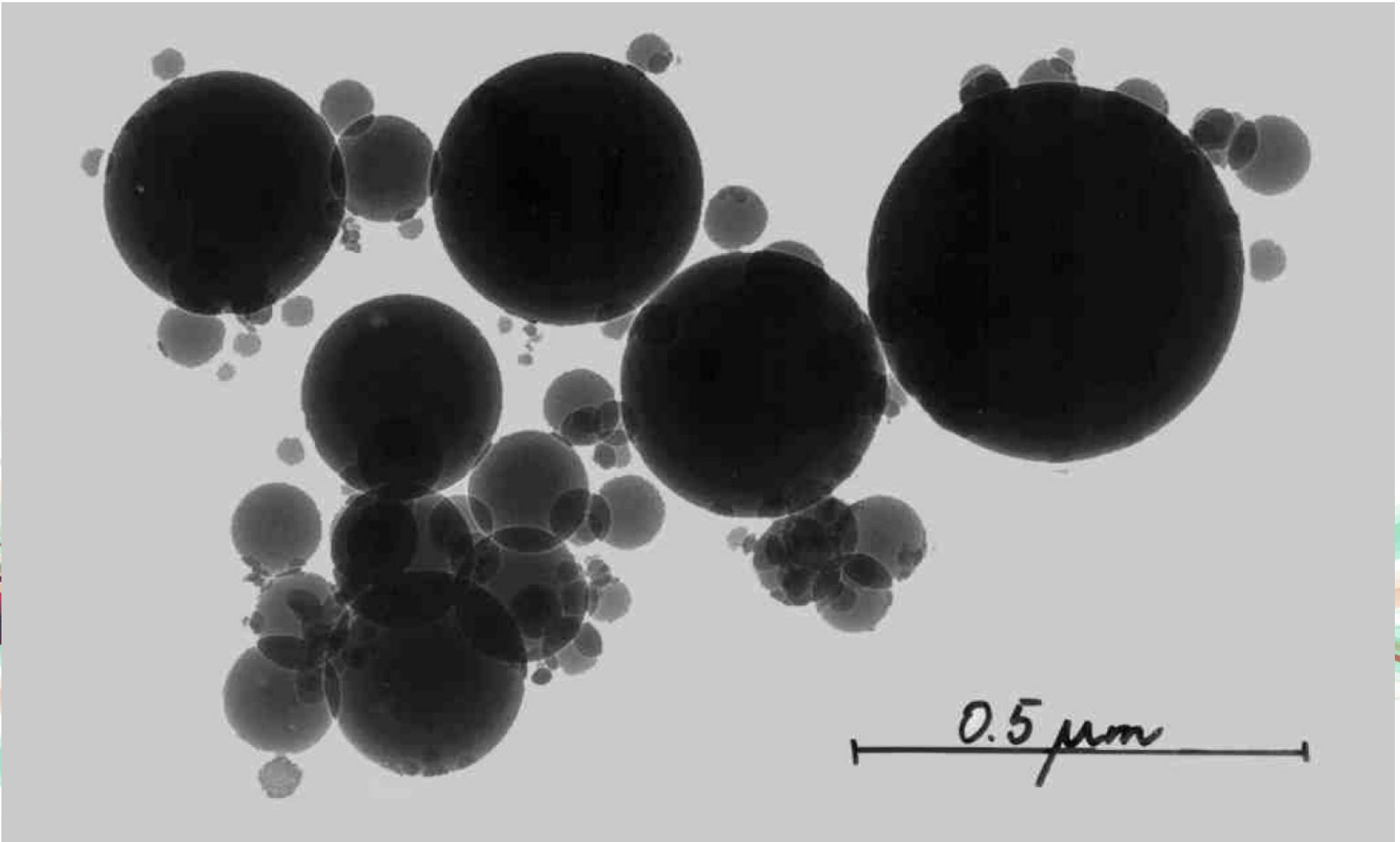
Spring 2001

Spring 2002

Xibei Ferroalloys, China

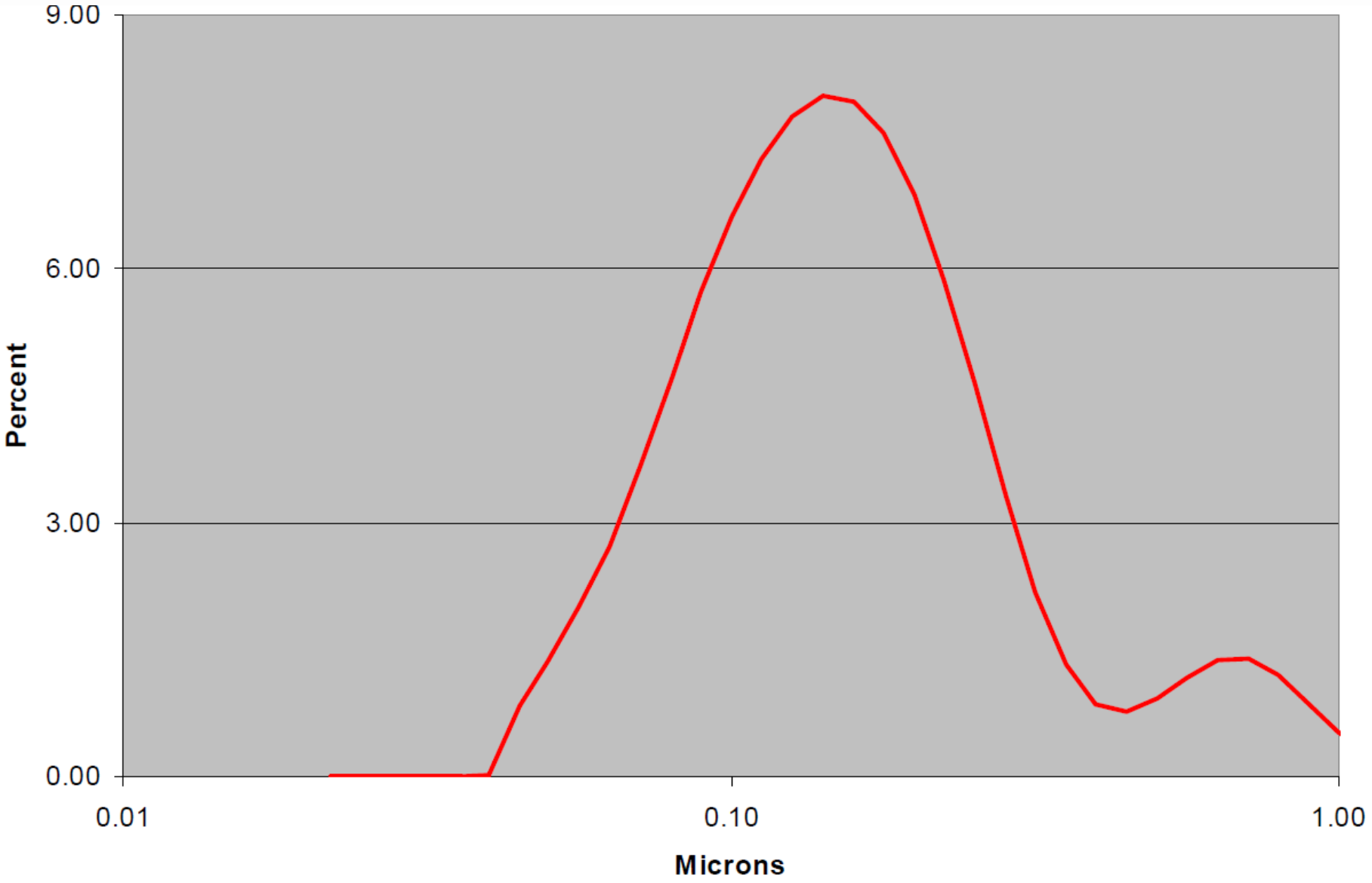
۳- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی میکرو سیلیس

❖ توزیع اندازهٔ ذرات؛ Particle Size Distribution (PSD)



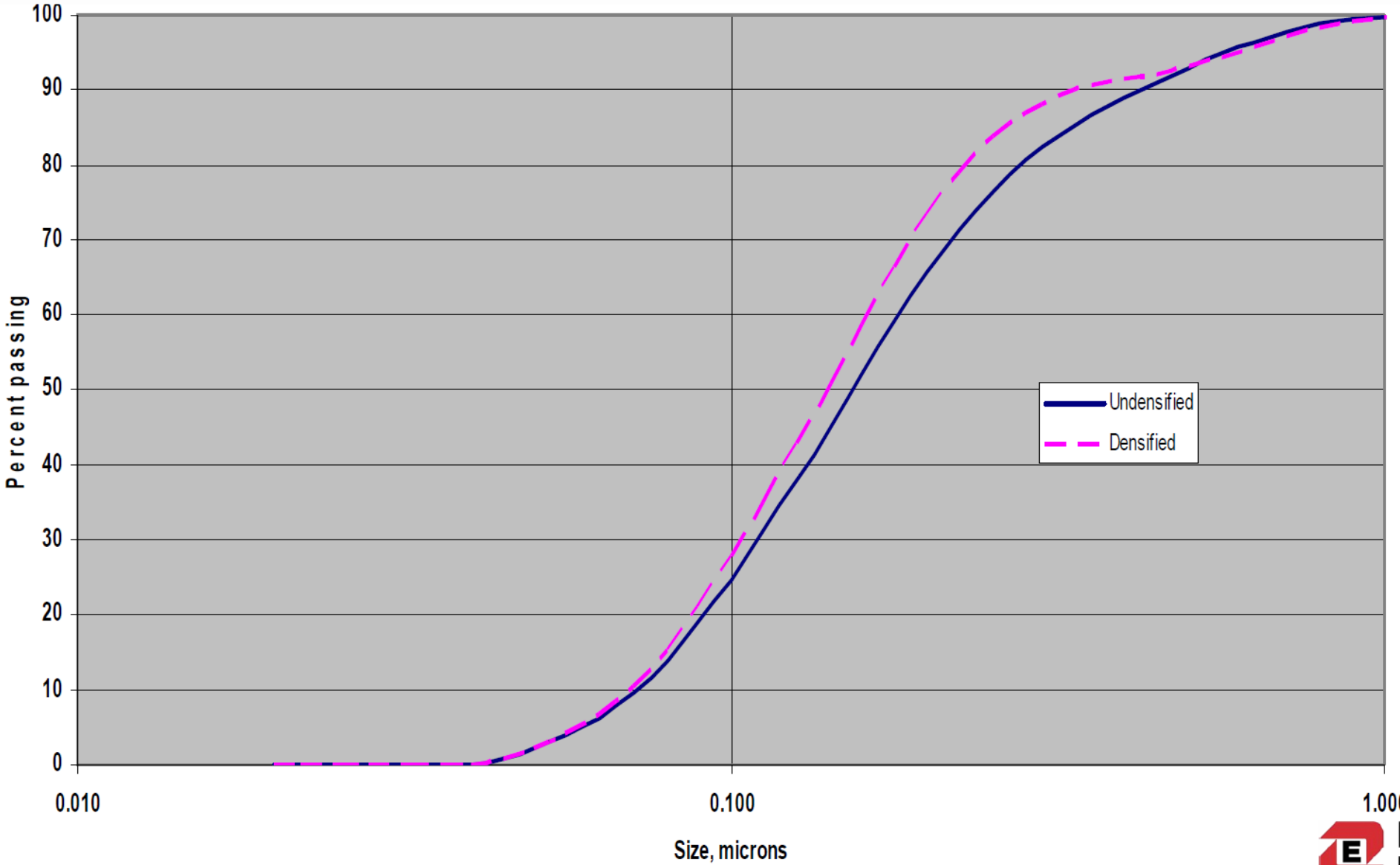
۳- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی میکرو سیلیس

❖ توزیع اندازهٔ ذرات؛ Particle Size Distribution (PSD)



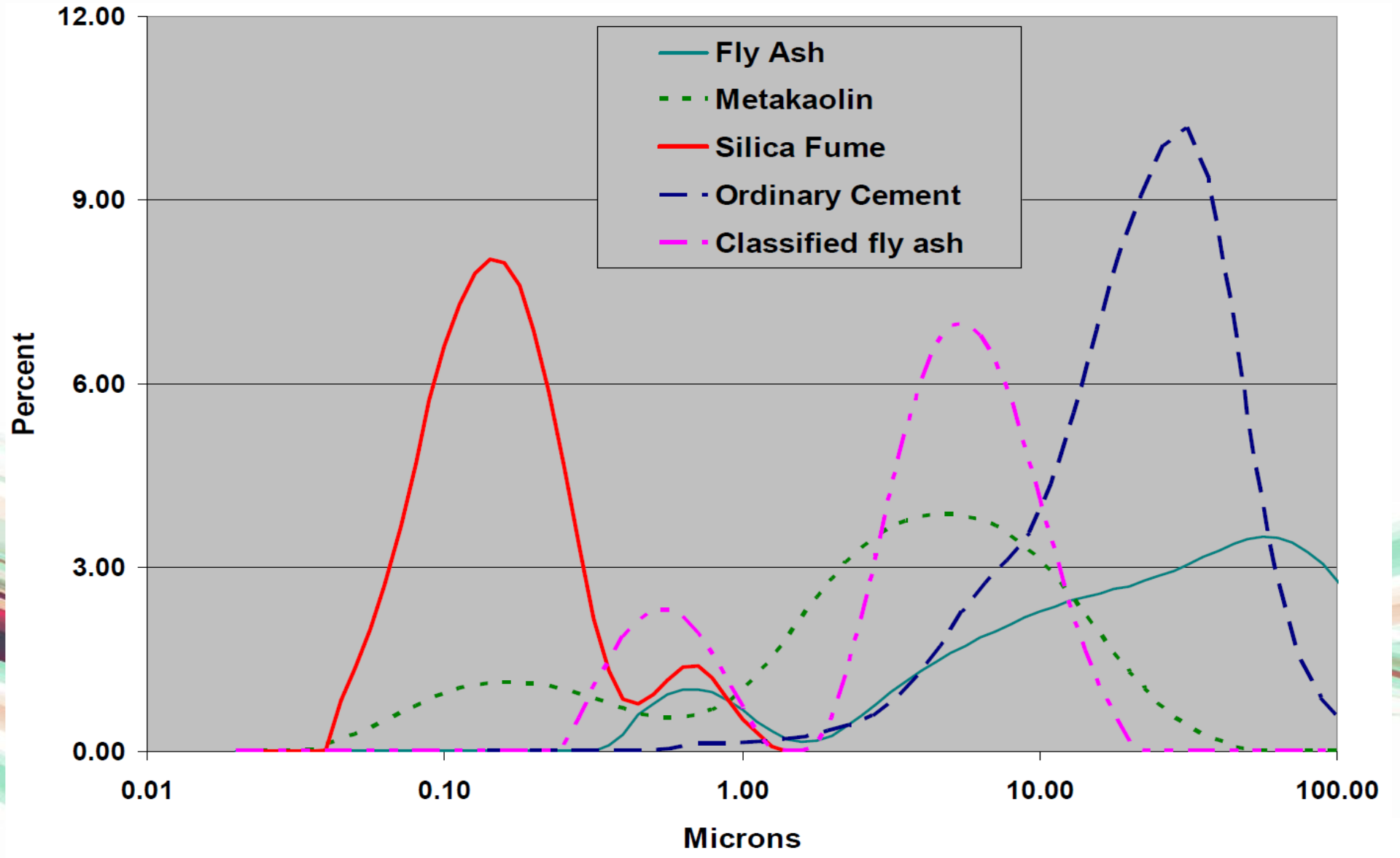
۳- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی میکرو سیلیس

❖ توزیع اندازهٔ ذرات؛ Particle Size Distribution (PSD)



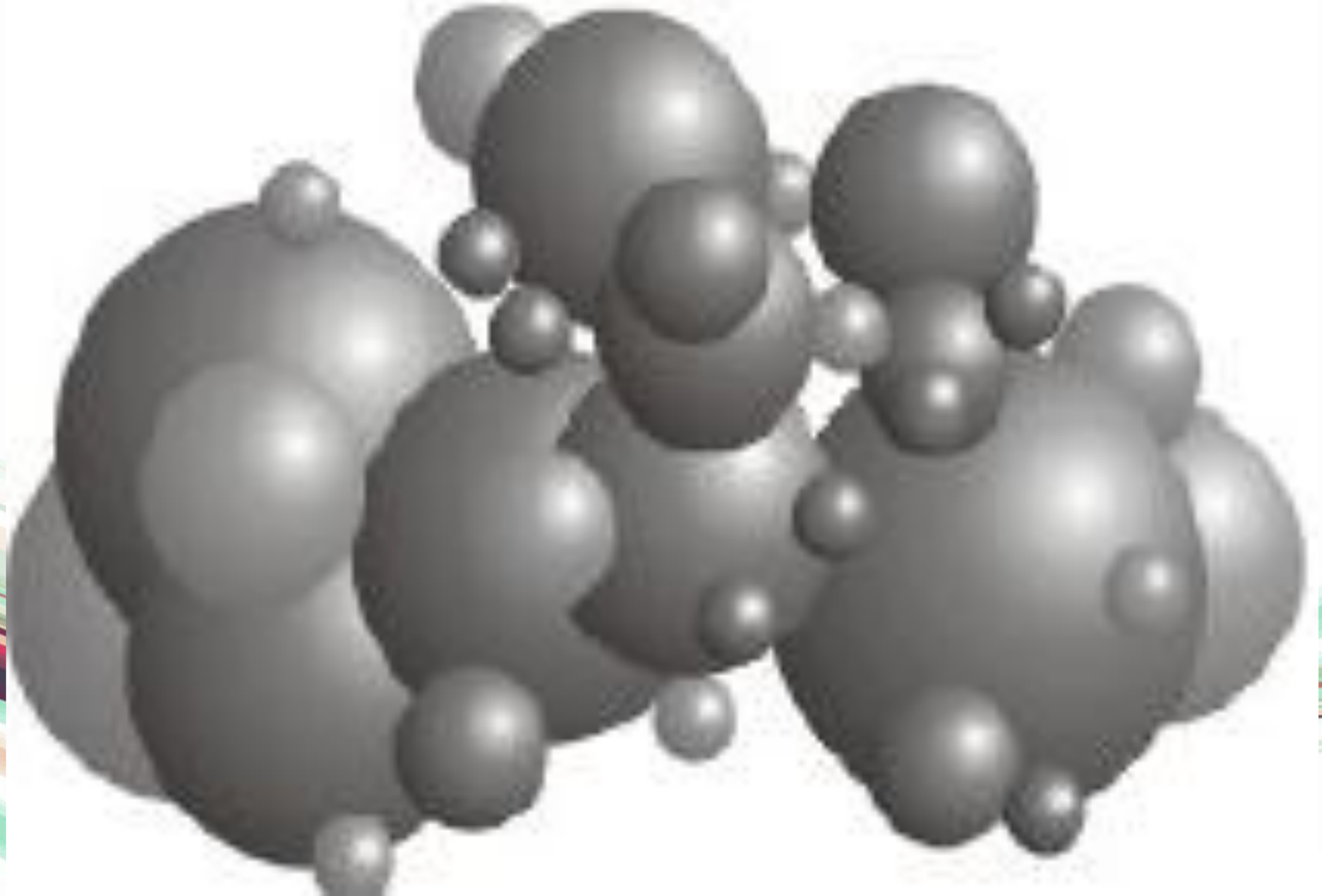
۳- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی میکرو سیلیس

❖ توزیع اندازهٔ ذرات؛ Particle Size Distribution (PSD)



۳- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی میکرو سیلیس

❖ توزیع اندازهٔ ذرات؛ Particle Size Distribution (PSD)



۳- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی میکرو سیلیس

❖ اولین تحقیقات مرتبط با میکرو سیلیس

- **James William Sharp (1944)**
  - Patent on ”Silica modified cement”, assigned to Permanente Cement Company
  - Focussed on plastic cements, 3-5% silica fume
  - Noted that bleeding was substantially reduced
  - Also observed a 40% increase in 90-days strength for concrete

- **Carl Johan Bernhardt (1952)**
  - Worked with cement replacement – up to 30%
  - Reported a significant increase in compressive strength ”in reasonable mixes”
  - Documented improvements in sulphate- and freeze-thaw resistance in mixes with 10-15% cement replacement
  - First known published technical paper on silica fume-concrete (April 1952)

۴- استفاده از میکرو سیلیس در بتن

۱ روش‌های عرضهٔ میکروسیلیس جهت مصرف

۱) پودر میکرو سیلیس

۲) سیمان میکروسیلیسی

۳) ژل میکرو سیلیس

- ژل میکرو سیلیس
- به صورت آماده از بازار
- آماده کردن ژل در کارگاه با یک مخلوط کن ویژه با دور بالا

۴- استفاده از میکرو سیلیس در بتن

۱ روش‌های عرضهٔ میکروسیلیس جهت مصرف

- غلظت ژل میکرو سیلیس
- ژل رقیق SF/W = 1/5
- ژل غلیظ SF/W = 2/3

۴- استفاده از میکرو سیلیس در بتن

۲ نقش میکروسیلیس در خمیر سیمان و بتن

به دلیل نرمی زیاد، تمام حفره های میکروسکوپی خمیر سیمان را پر کرده و بتن کاملا توپری فراهم می کند.

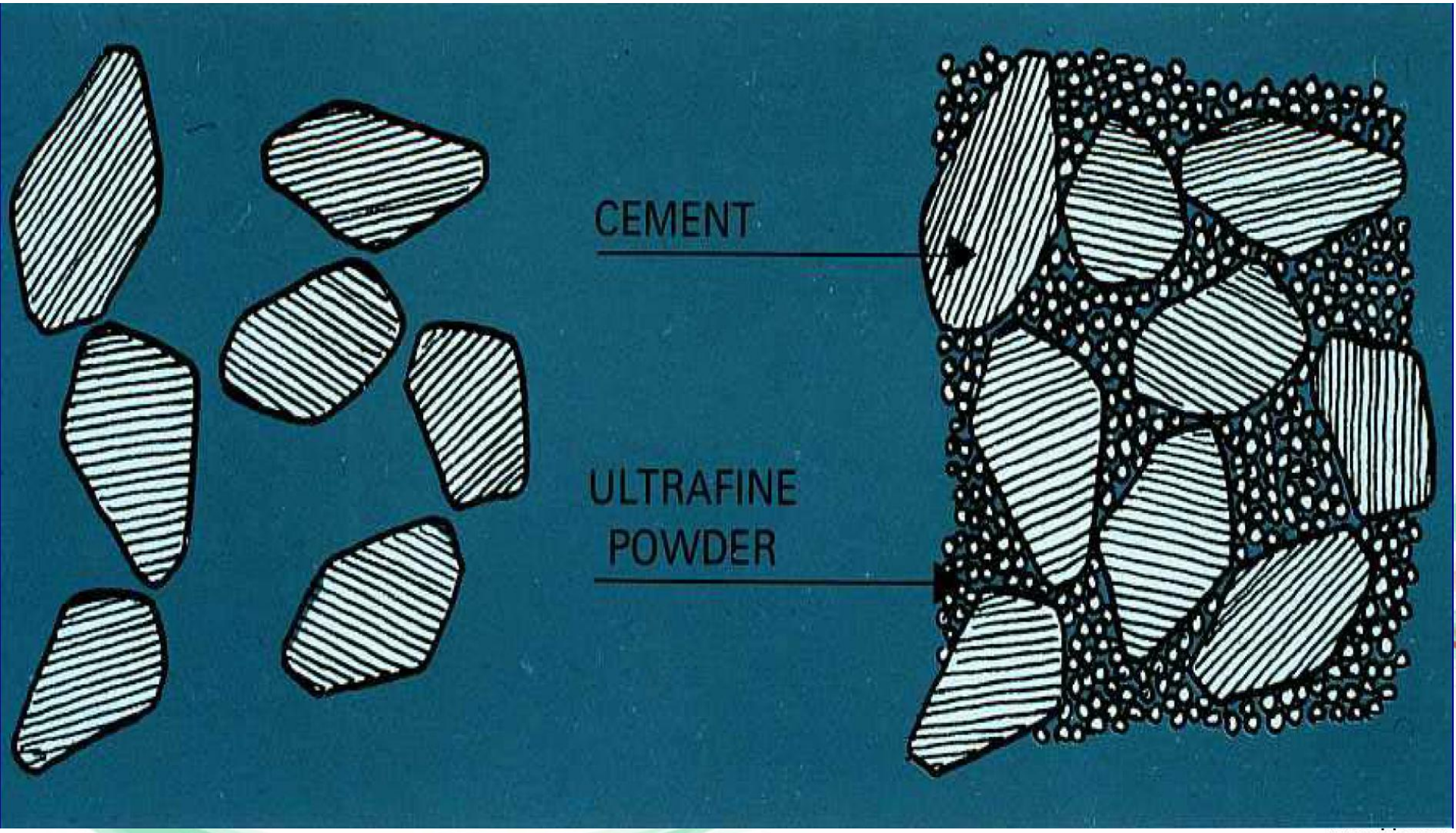
۲ نقش اساسی

با خاصیت سیمانی و پوزولانی، ترکیبات جدیدی از C-S-H تولید کرده و بافت مستحکم تری فراهم می کند.

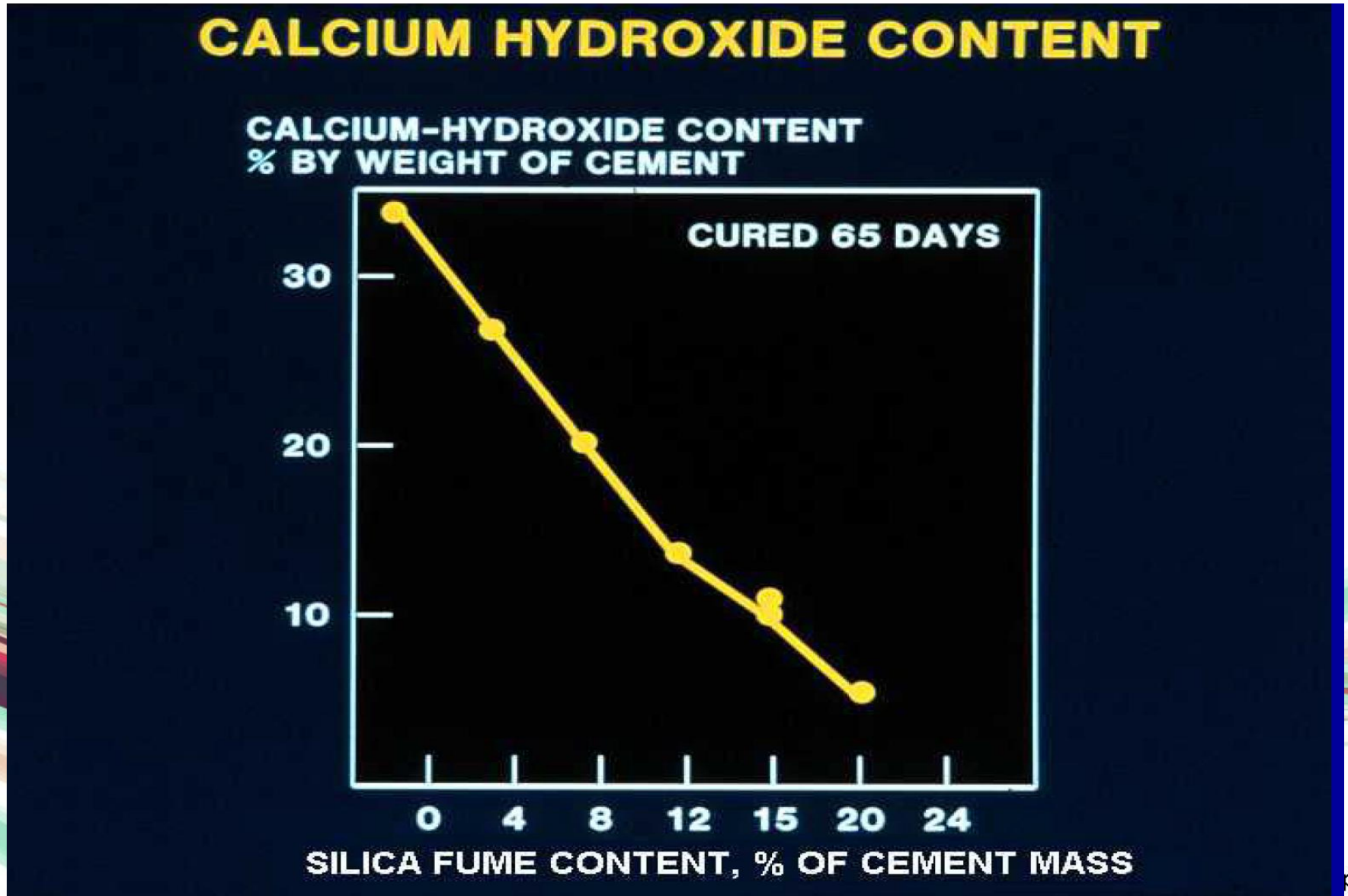
دوام بالاتر

مقاومت بالاتر

تاثیر فیزیکی



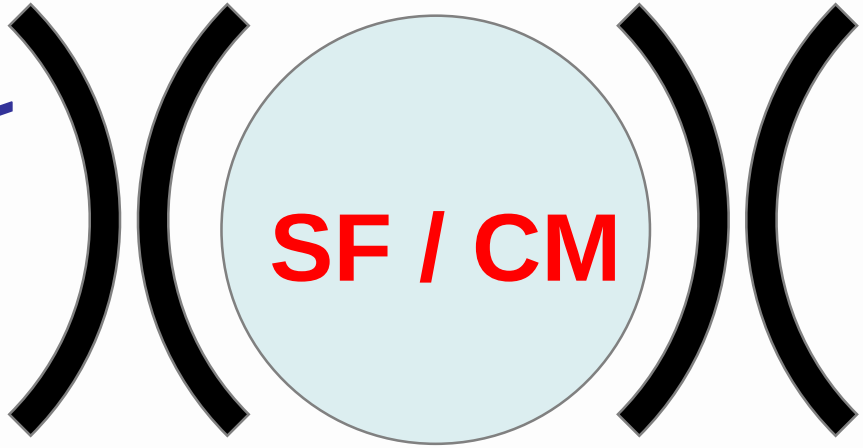
تاثیر شیمیایی



ppt.info

۴- استفاده از میکرو سیلیس در بتن

۳ میزان مصرف میکروسیلیس



10%
(و یا بالاتر)

7-8%

۴- استفاده از میکرو سیلیس در بتن

۴ مشکلات مصرف میکروسیلیس در بتن

۱) تفرق و اختلاط مناسب میکروسیلیس

الف) استفاده از فوق روان کنندهٔ مرغوب

ب) استفاده از ژل (جهت کاهش انرژی لازم برای اختلاط)

۴- استفاده از میکرو سیلیس در بتن

۴ مشکلات مصرف میکروسیلیس در بتن

۲) کاهش قابل ملاحظه در آب انداختگی

الف) مراقبت سطحی

ب) پرداخت سطحی

۴- استفاده از میکرو سیلیس در بتن

۴ مشکلات مصرف میکروسیلیس در بتن

۳) اهمیت قابل ملاحظهٔ کنترل کیفیت

الف) اجرا باید به خوبی مصالح مورد مصرف باشد!

ب) اهمیت دانش فنی دست اندر کاران تولید و اجرا

۴- استفاده از میکرو سیلیس در بتن

۵ تاثیر استفاده از میکروسیلیس در بتن

۴- استفاده از میکرو سیلیس در بتن

۵ تاثیر استفاده از میکروسیلیس در بتن

۱۰) افزایش پیوستگی

۱۱) جدا شدگی کمتر

۱۲) بتن پاششی بهتر

۱۳) کاهش یا حذف آب انداختگی

۱۴) کم کردن آب انداختگی داخلی

۱۵) سطح تمام شدهٔ بهتر

۵ - کاربردهای میکرو سیلیس در عمل

۱ بتن با مقاومت بالا در ستون‌های ساختمان‌های بلند مرتبه

Chicago Tower

- 3 grades of strength
- Reduced column size
- Fast-track construction

۵ - کاربردهای میکرو سیلیس در عمل

۱ بتن با مقاومت بالا در ستون‌های ساختمان‌های بلند مرتبه

Petronas Tower

- Colunbs: 80 MPa
- Beams: 60 MPa
- Pumped 88 stories high

۵ – کاربردهای میکرو سیلیس در عمل

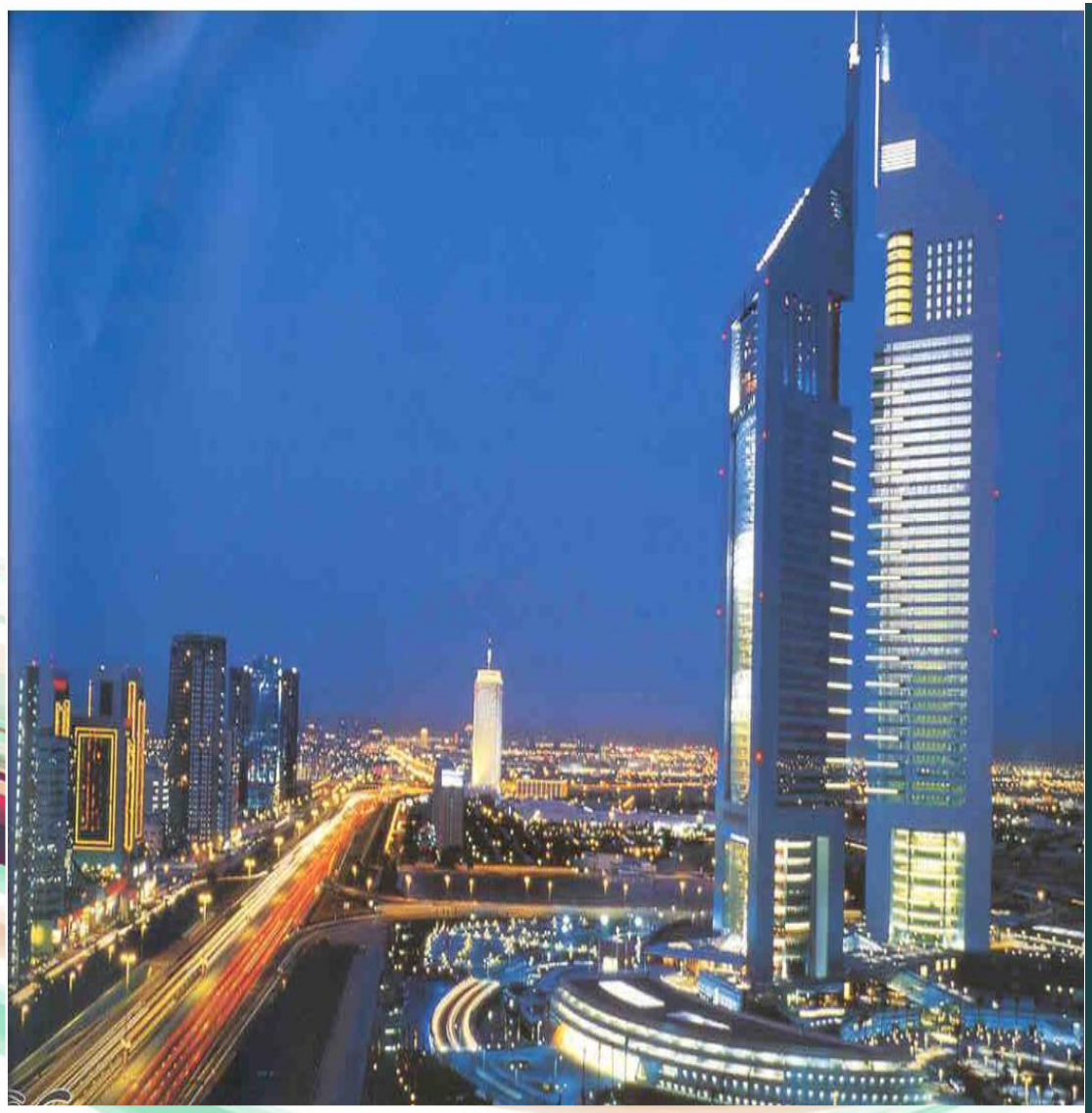
۱ بتن با مقاومت بالا در ستون‌های ساختمان‌های بلند مرتبه

Dubai Tower

- 350,000 m3 HSC
- Columns: 80 MPa
- Pumping all the way – single stage

۵ - کاربردهای میکرو سیلیس در عمل

۱ بتن با مقاومت بالا در ستون‌های ساختمان‌های بلند مرتبه



Emirates Tower

- Skyscraper (355 m)
- Columns: > 80 MPa
- Pumping all the way

۵ – کاربردهای میکرو سیلیس در عمل

۲ کف های صنعتی

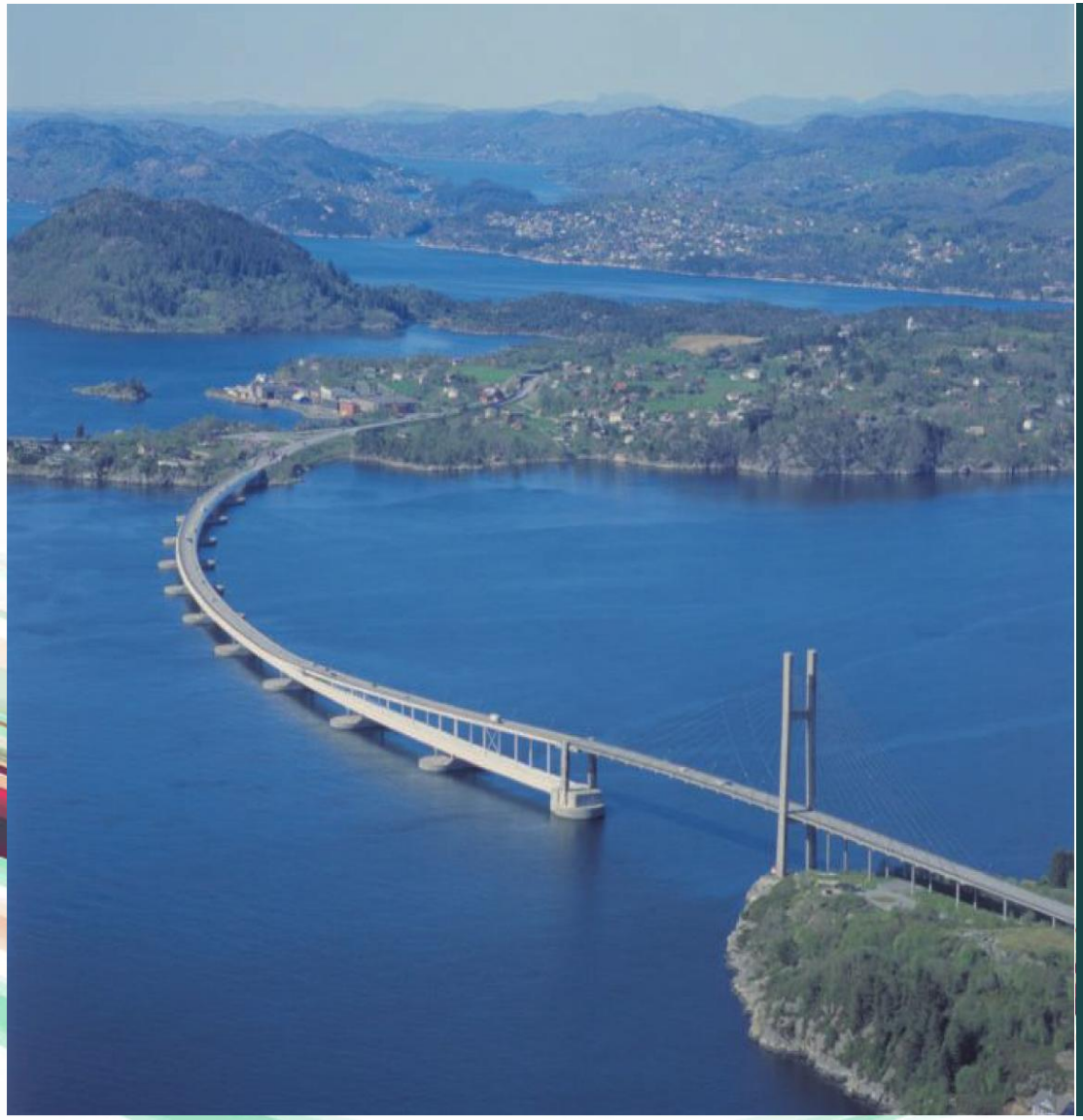
Waste Transfer Station

Alton, Hampshire

- **6800 m2 floor**
- **Columns: 40 MPa**
- **Steel fibers**

۵ – کاربردهای میکرو سیلیس در عمل

۳ سازه های دریایی و ساحلی



Nordhordland Bridge

Norway

- **LWC**
- **1900 kg/m3**
- **60 – 70 MPa**

۵ – کاربردهای میکرو سیلیس در عمل

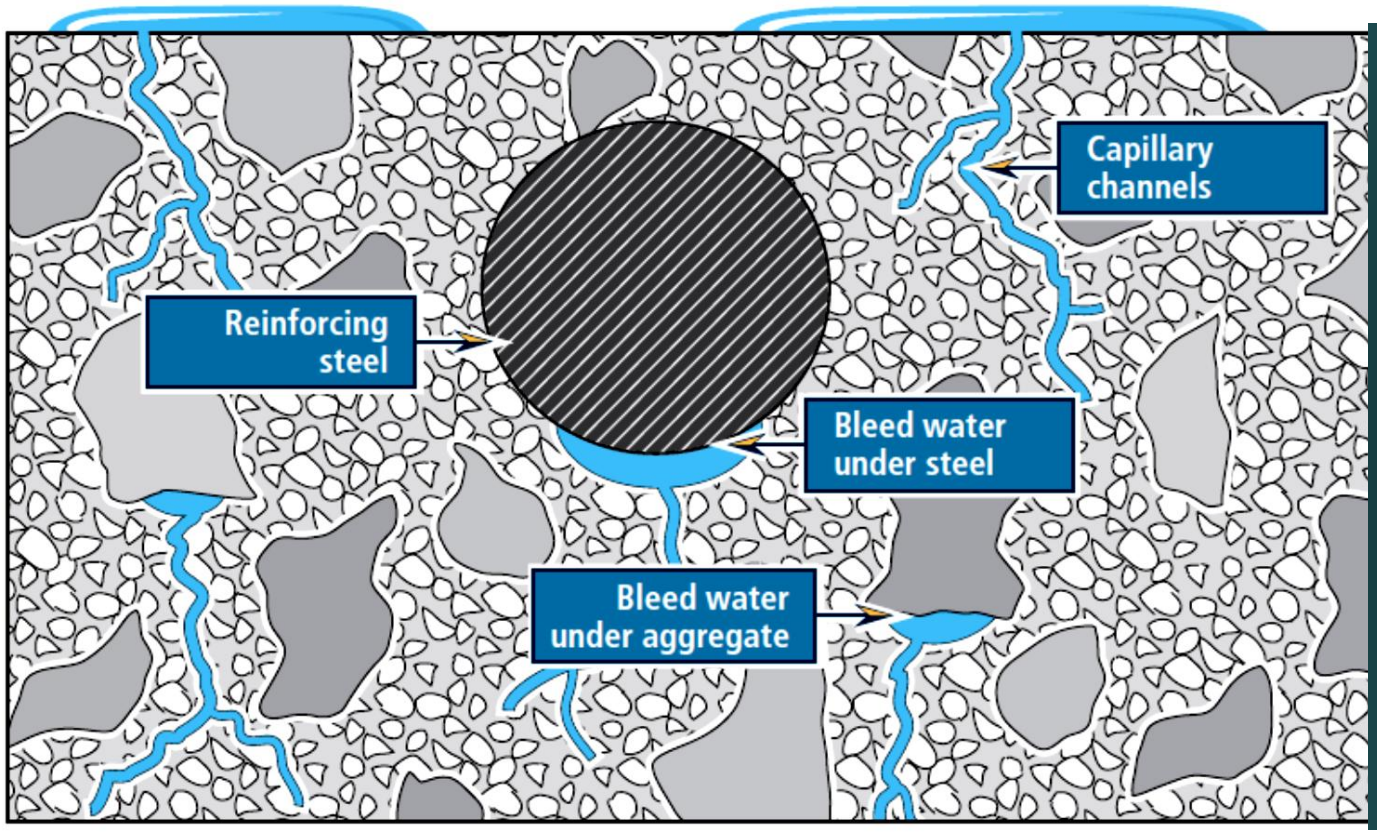
۳ سازه های دریایی و ساحلی

Offshore

Troll Platform

- **1.2 M Tones**
- **245,000 m3 concrete**
- **100,000 Tones steel bars**

۵ - کاربردهای میکرو سیلیس در عمل



میکروسیلیس موجب مسدود شدن کانال های مویرگی تعریق بتن می‌شود .

۵ – کاربردهای میکرو سیلیس در عمل

۳ سازه‌های آبی و سدها

Kinsua Dam

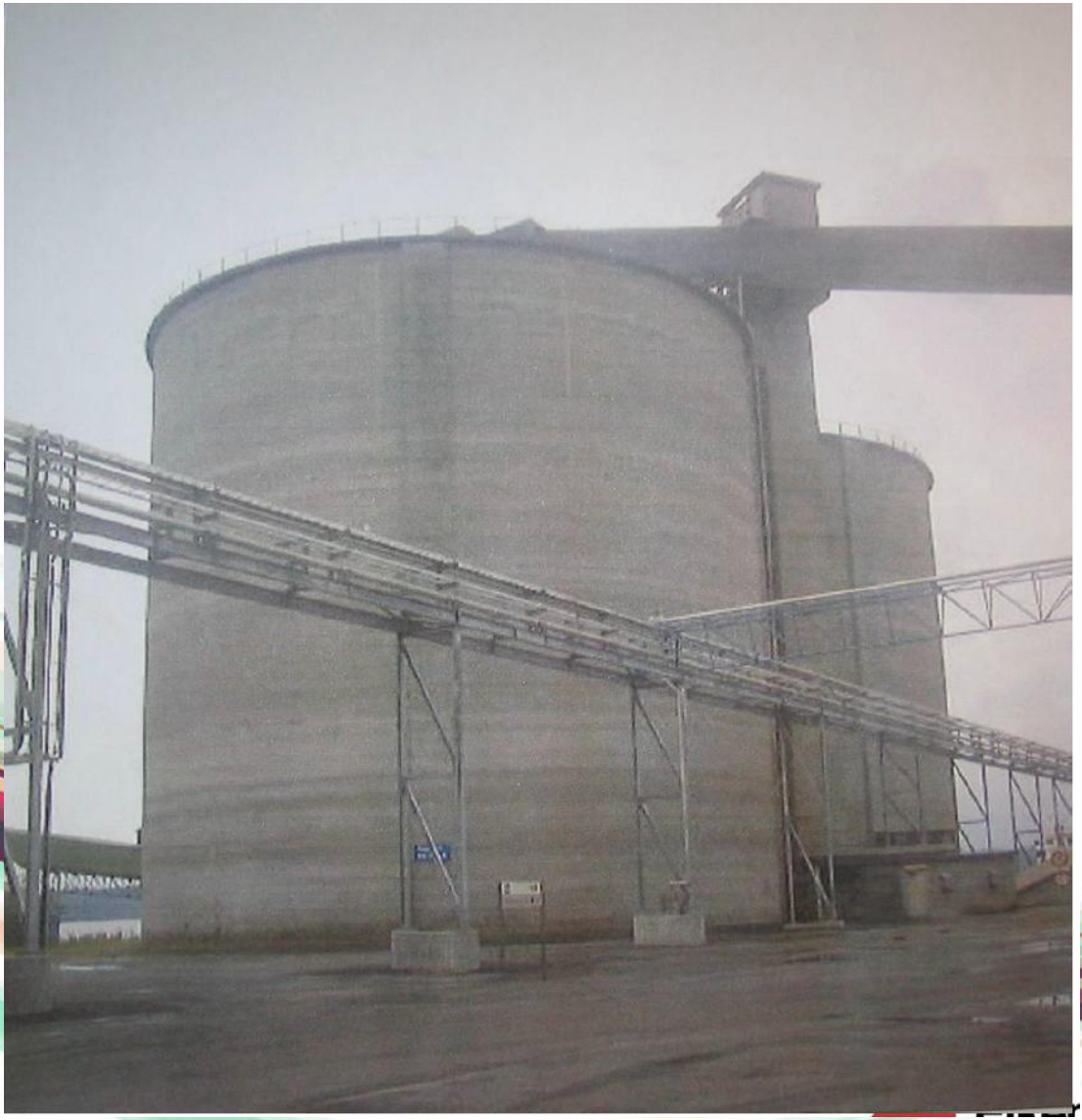
Norway

- **Still in good shape after 30 years**

۵ – کاربردهای میکرو سیلیس در عمل

سیلوهای ذخیره

۴



Storage Silos

Norway

- **Early 1970’s**

۵ - کاربردهای میکرو سیلیس در عمل

۴ سازه‌های مربوط به تاسیسات اتمی

Nuclear Plant Dome

India

- **2010**

۵ – کاربردهای میکرو سیلیس در عمل

۴ سازه‌ها و تاسیسات فرودگاه

Dubai Airport

- 2 Million m3

۶ – آیین نامه های مرتبط با میکرو سیلیس

- راهنمای ACI (ACI Guidance)
- استاندارد ASTM C 1240
- استاندارد AASHTO M307

۶ – آیین نامه های مرتبط با میکرو سیلیس

راهنمای ACI
(ACI Guidance)

ACI 234R-96
(Reapproved 2000)

Guide for the Use of Silica Fume in Concrete*

Reported by ACI Committee 234

Terence C. Holland
Chairman

Rachel Detwiler
Secretary

Pierre-Claude Aïtcin
Dennis O. Arney
Bayard M. Call
Menashi D. Cohen
Guy Detwiler
Per Fidjestol
Margaret E. Fiery
Fouad H. Fouad
William Halczak
R. D. Hooton
Allen J. Hulshizer
Tarif M. Jaber
Paul Klieger
Ronald L. Larsen
Mark D. Luther
V. M. Malhotra
Bryant Mather
D. R. Morgan
Jan Olek
H. Celik Ozyildirim
Harry L. Patterson
Michael F. Pistilli
Narasimhan Rajendran
Donald L. Schlegel
Woodward L. Vogt
Thomas G. Weil
David A. Whiting
John T. Wolsiefer

۶ – آیین نامه های مرتبط با میکرو سیلیس

استاندارد ASTM C 1240

Designation: C 1240 – 04

Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures[1]

This standard is issued under the fixed designation C 1240; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

۶ – آیین نامه های مرتبط با میکرو سیلیس

استاندارد AASHTO M307

Standard Specification for

Use of Silica Fume as a Mineral Admixture in Hydraulic-Cement Concrete, Mortar, and Grout

AASHTO Designation: M 307-04
ASTM Designation: C 1240-03

۶ – آیین نامه های مرتبط با میکرو سیلیس

Mandatory chemical and physical requirements	American ASTM C1240 – 04	European EN 13263:2005	Canadian CAN/CSA A23.5 - 98	Japanese JIS A 6207 2000	Chinese GB/T18736 -2002	Brazilian NBR 13956:1997	Korean KS F 2567 2003	Vietnamese TCXDVN 311 - 2003	Indian IS 15388:2003
SiO_2 (%)	> 85,0	> 85	> 85	> 85	> 85	> 85	> 85	> 85	> 85,0
SO_3 (%)		< 2,0	< 1,0	< 3,0			< 3,0		
Cl (%)		< 0,3		< 0,1	< 0,2		< 0,3		
Free CaO (%)		< 1,0		< 1,0					
MgO (%)				< 5,0			< 5,0		
Free Si (%)		< 0,4							
Available alkalis (Na_2O equivalent, %)	Report					< 1,5			< 1,5
Moisture (%)	< 3,0			< 3,0	< 3,0	< 3,0		< 3,0	< 3,0
Loss on Ignition (%)	< 6,0	< 4,0	< 6,0	< 5,0	< 6,0	< 6,0	< 5,0	< 6,0	< 4,0
Specific surface (m^2/gram)	> 15	15 - 35		> 15	> 15		> 15		> 15
Bulk density, undensified	Report								
Pozzolanic Activity Index (%)	> 105 @ 7d, accel. curing	> 100 @ 28d, std curing		> 95 @ 7d > 105 @ 28d, std curing	> 85 @ 28d, std curing		> 95 @ 7d, accel. curing	> 85 @ 7d	> 85,0 @ 7d, 27 ^{0}C curing
Retained on 45 micron sieve (%)	< 10		< 10			< 10	< 5,0	< 10	< 10
Variation from average on 45 micron sieve (%-points)	< 5								< 5
Density (kg/m^3)	Report								
Autoclave expansion (%)			< 0,2						
Foaming			No foam						
Dry mass (%-points deviation from declared in slurry)		< 2					< 2		
Water requirement ratio (%)					< 125				

* مشخصات لازم بر اساس آیین نامه ها

تحقیقات انجام شده در دانشگاه صنعتی اصفهان

- **بررسی تأثیر عوامل شیمیایی سولفات و کلرور بر بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک**

www.fppt.info

در این تحقیق نقش
میکروسیلیس و پودر سنگ آهک
به عنوان دو مادهٔ جایگزین
به جای سیمان مورد بررسی قرار گرفت

www.fppt.info

تأثیر میکروسیلیس بر دوام بتن در مقابل سولفاتها

مواد پوزولانی + $Ca(OH)_2$ ⟶ C-S-H

۱- با کاهش میزان سیمان C_3A نیز کاهش می‌یابد.

۲- مقدار تولید گچ که محصول واکنش هیدروکسید کلسیم و یون سولفات است، کاهش می‌یابد.

۳- نفوذپذیری بتن کاهش می‌یابد.

۴- با مصرف $Ca(OH)_2$، pH کاهش می‌یابد و در نتیجه اترینگایت کمتر تشکیل می‌شود.

www.fppt.info

روند انجام تحقیق

۱- ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

طرح اختلاط شامل

۳ نوع نسبت آب به مواد سیمانی $(\frac{W}{CM})$ ← ۰/۲۵، ۰/۳ و ۰/۴

۳ نوع نسبت پودر سنگ آهک به سیمان $(\frac{LP}{C})$ ← ۰، ۱۵ و ۳۰ درصد

۴ نوع نسبت میکروسیلیس به مواد سیمانی $(\frac{SF}{CM})$

۰٪ - ۵٪ - ۱۰٪ و ۱۰٪ به همراه ۷٪ هوا

تعداد طرح اختلاط = ۳ × ۴×۳=۳۶

نمونه‌ها مکعبی و به ابعاد ۷۰ میلیمتر بود

www.fppt.info

روند انجام تحقیق

۱- ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

مصالح مورد استفاده:

- سیمان تیپ I کارخانهٔ سیمان اصفهان با چگالی ۳/۱۵ با سطح مخصوص ۳۰۰ m^2/kg

میکروسیلیس با چگالی ۲/۲۱ و با سطح مخصوص ۱۴۰۰ m^2/kg

پودر سنگ آهک با چگالی ۲/۸۵ و با سطح مخصوص ۶۰۰ m^2/kg و با قطر متوسط ۲۰ میکرون

فوق روان کنندهٔ ملمنت

ریز دانهٔ اهکی و درشت دانهٔ آهکی ۱۰-۵ mm

مادهٔ هوازای سیکا

0:0:00

طرح اختلاط بتن

طرح اختلاط بتن معمولی (ACI 211.1)

طرح اختلاط بتن با مقاومت بالا
حاوی خاکستر بادی (ACI 211.4R.93)

ACI 363R (گزارشی در مورد بتن با مقاومت بالا)

۱- میزان آب از جدول ACI 211.1

۲- بر اساس توصیهٔ ACI 211.4R.93، ۳۰٪ از میزان آب کاسته شد

www.fppt.info

طرح اختلاط بتن (ادامه)

۳- بر اساس W/CM میزان مواد سیمانی بدست می‌آید و بر اساس SF/CM و LP/C میزان سیمان، میکروسیلیس و پودر سنگ آهک بدست می‌آید.

۴- میزان فوق روان‌کننده با ساخت نمونه‌های آزمایشی و انجام سعی و خطا تا رسیدن به اسلامپ ۱۰-۸ بدست می‌آید.

با افزایش میزان مصرف میکروسیلیس، میزان مصرف فوق روان کننده بیشتر می‌شود.

با افزایش میزان مصرف پودر سنگ آهک ، میزان مصرف فوق روان کننده کاهش می‌یابد.

www.fppt.info

طرح اختلاط بتن (ادامه)

۵- میزان مادهٔ هوازا نیز با ساخت نمونه‌های آزمایشی و انجام سعی و خطا بدست می‌آید.

۶- حجم درشت دانه ۵۰٪ حجم جامد بتن در نظر گرفته شد.

۷- حجم ریز دانه نیز به روش حجمی بدست می‌آید.

www.fppt.info

روند انجام تحقیق (ادامه)

۱- ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

۲- بیرون آوردن نمونه‌ها از قالب

۳- عمل آوری نمونه‌ها به مدت ۱۰ روز

۴- اندازه گیری وزن خشک و ابعاد نمونه‌ها

۵- قرار دادن نمونه‌ها در محلول‌های آزمایشگاهی

www.fppt.info

■ روند انجام تحقیق (ادامه)

۵- قرار دادن نمونه‌ها در محلول‌های آزمایشگاهی

محلول سولفات منیزیم با غلظت نیمه اشباع

محلول کلرید منیزیم با غلظت نیمه اشباع

محلول سولفات و کلرید منیزیم با غلظت نیمه اشباع

آب معمولی

از هر طرح اختلاط ۹ نمونه در هر محلول قرار گرفته شد.

۱۲۹۶= ۴×۹×۳۶= تعداد نمونه‌های بتنی ساخته شد.

روند انجام تحقیق (ادامه)

۵- انجام آزمایشات

آزمایشات در ۳ زمان (۳، ۵/۴ و ۶ ماه پس از قرارگیری در محلول) انجام گرفت

الف) آزمایش درصد کاهش جرم

ب) آزمایش درصد جذب آب

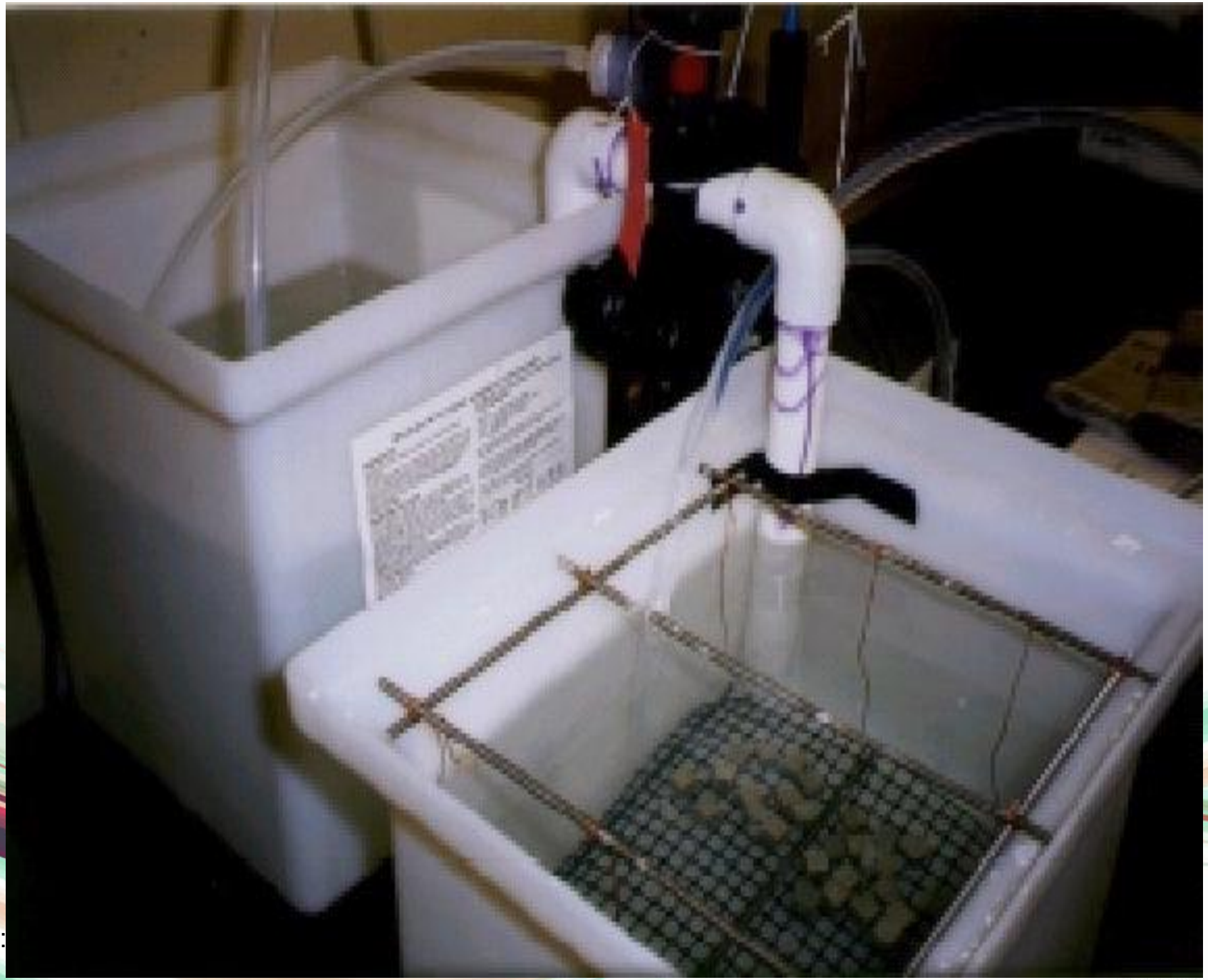
ج) درصد کاهش مقاومت فشاری

د) درصد انبساط نمونه‌ها

هـ) آزمایش تعیین عمق نفوذ یون کلر

و) آزمایش تعیین عمق نفوذ سولفات

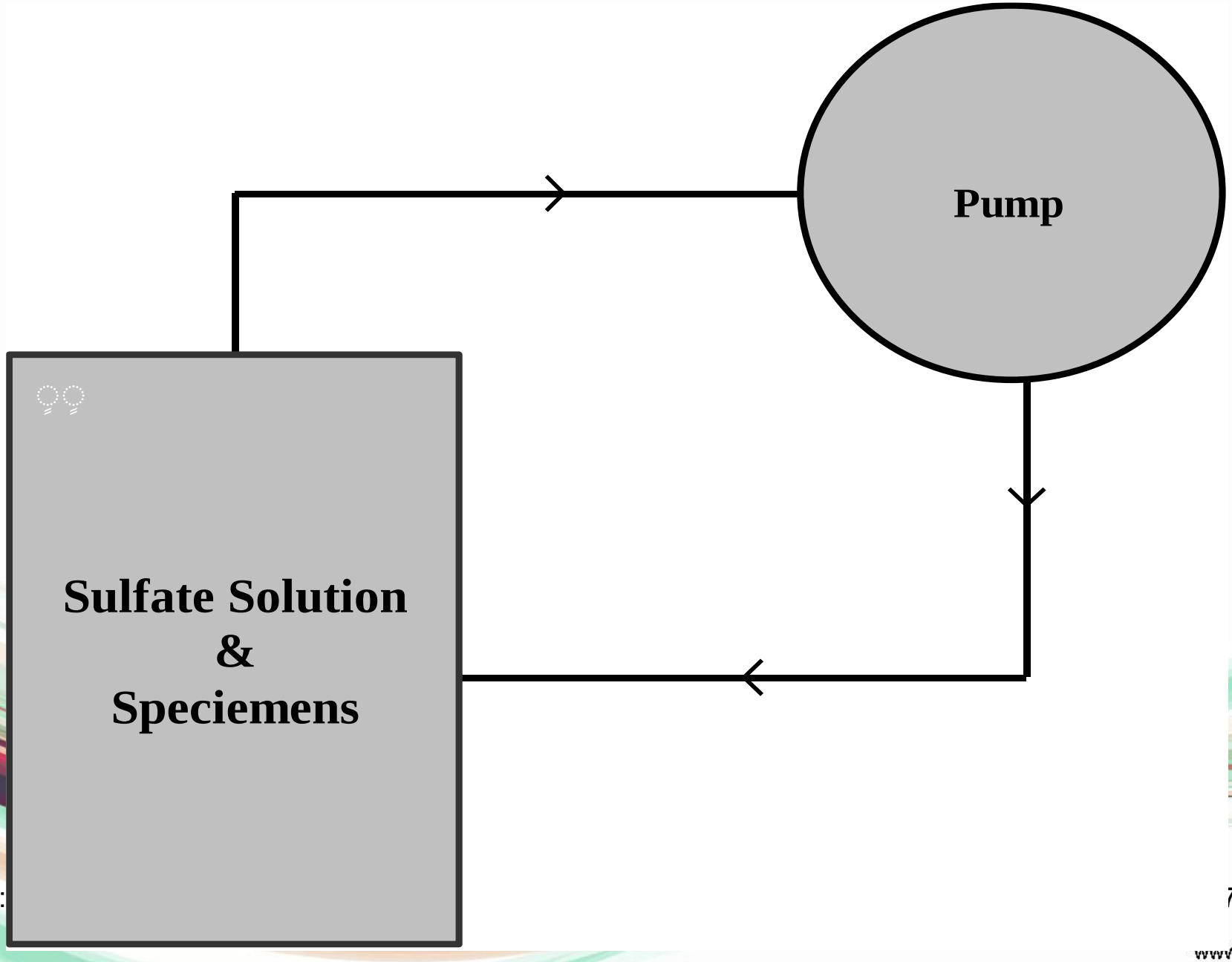
www.fppt.info



شکل 1-7- دستگاه آزمایش تسریع شده مربوط به آزمایش سولفات

www.fppt.info

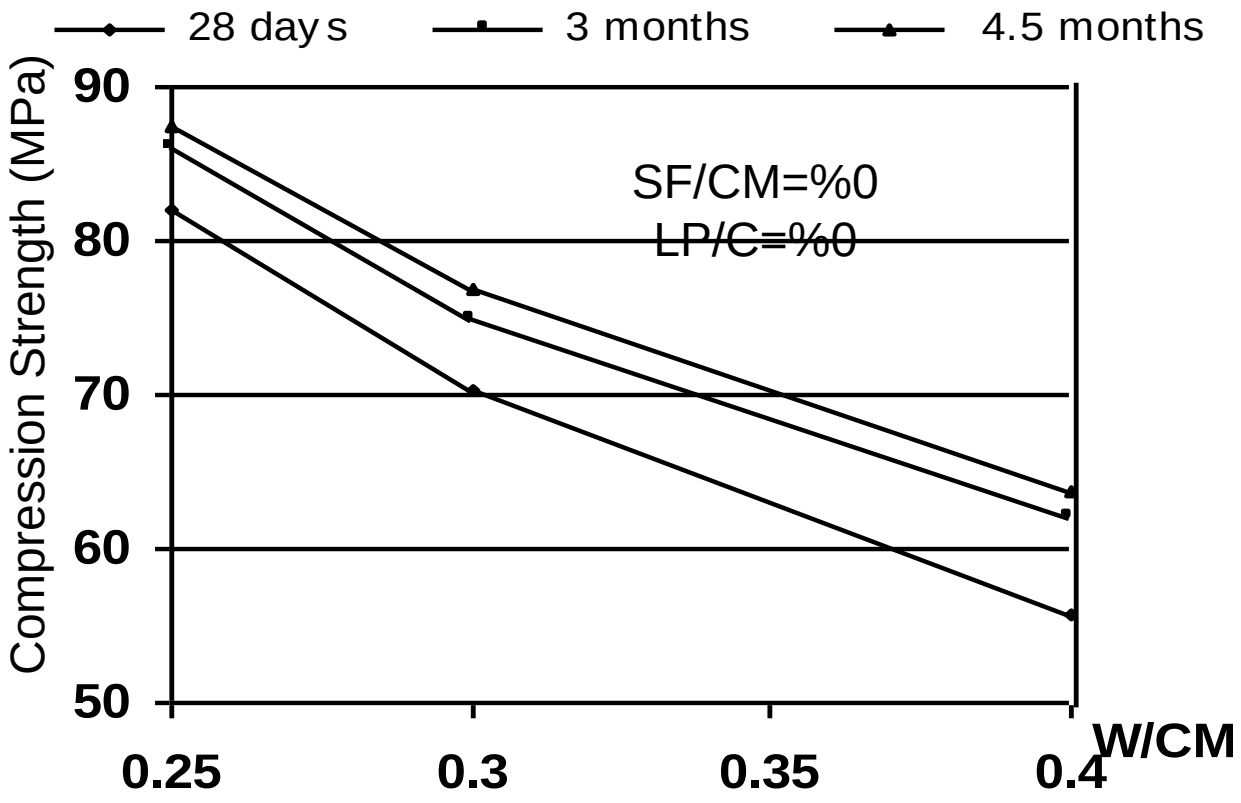
سیستم طراحی شده برای انجام این تحقیق



www.fppt.info

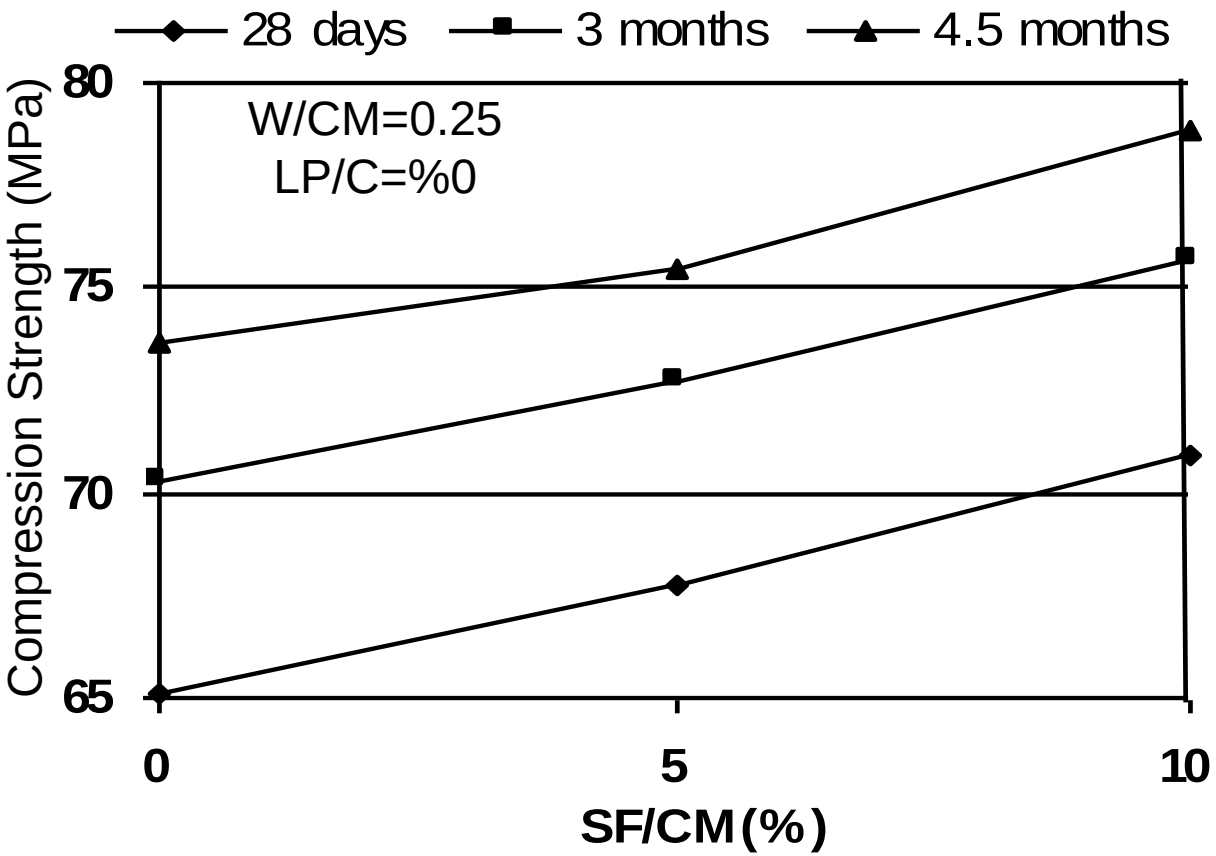
www.fppt.info

اثر W/CM بر مقاومت فشاری بتن



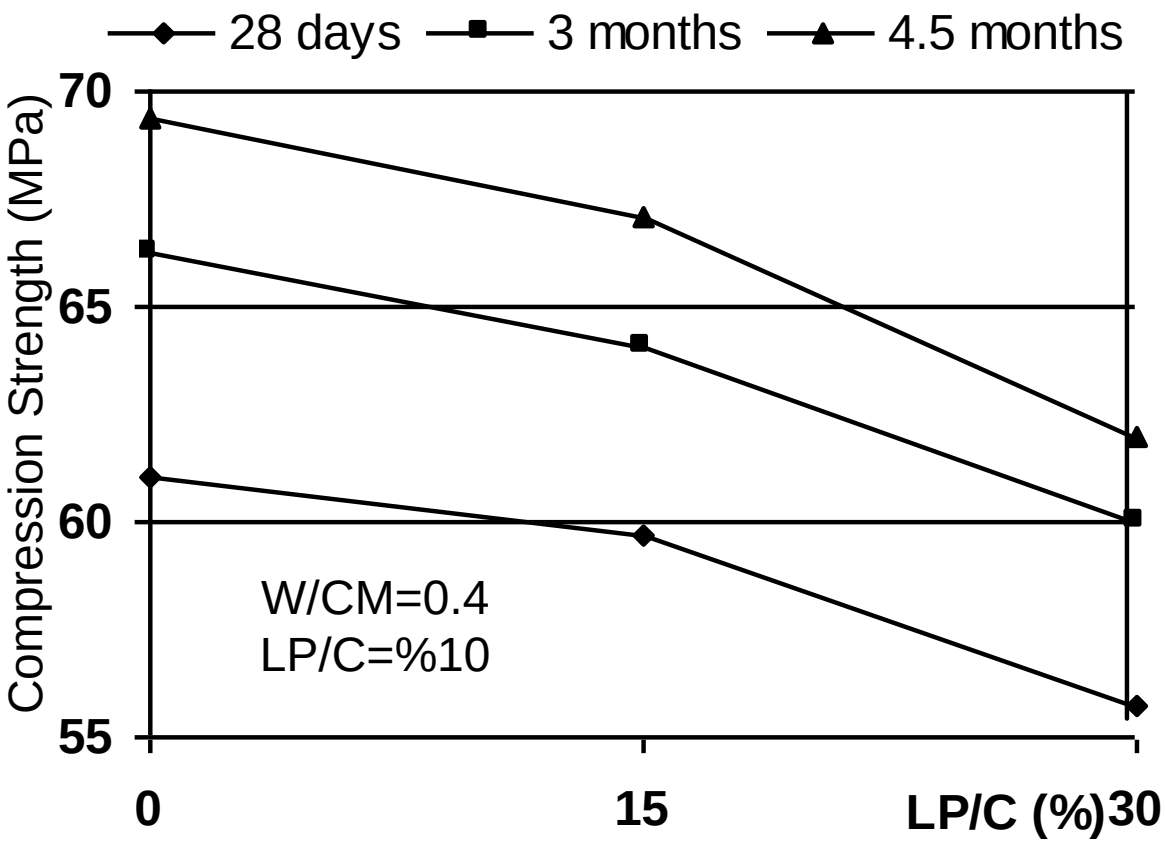
www.fppt.info

اثر SF/CM بر مقاومت فشاری بتن



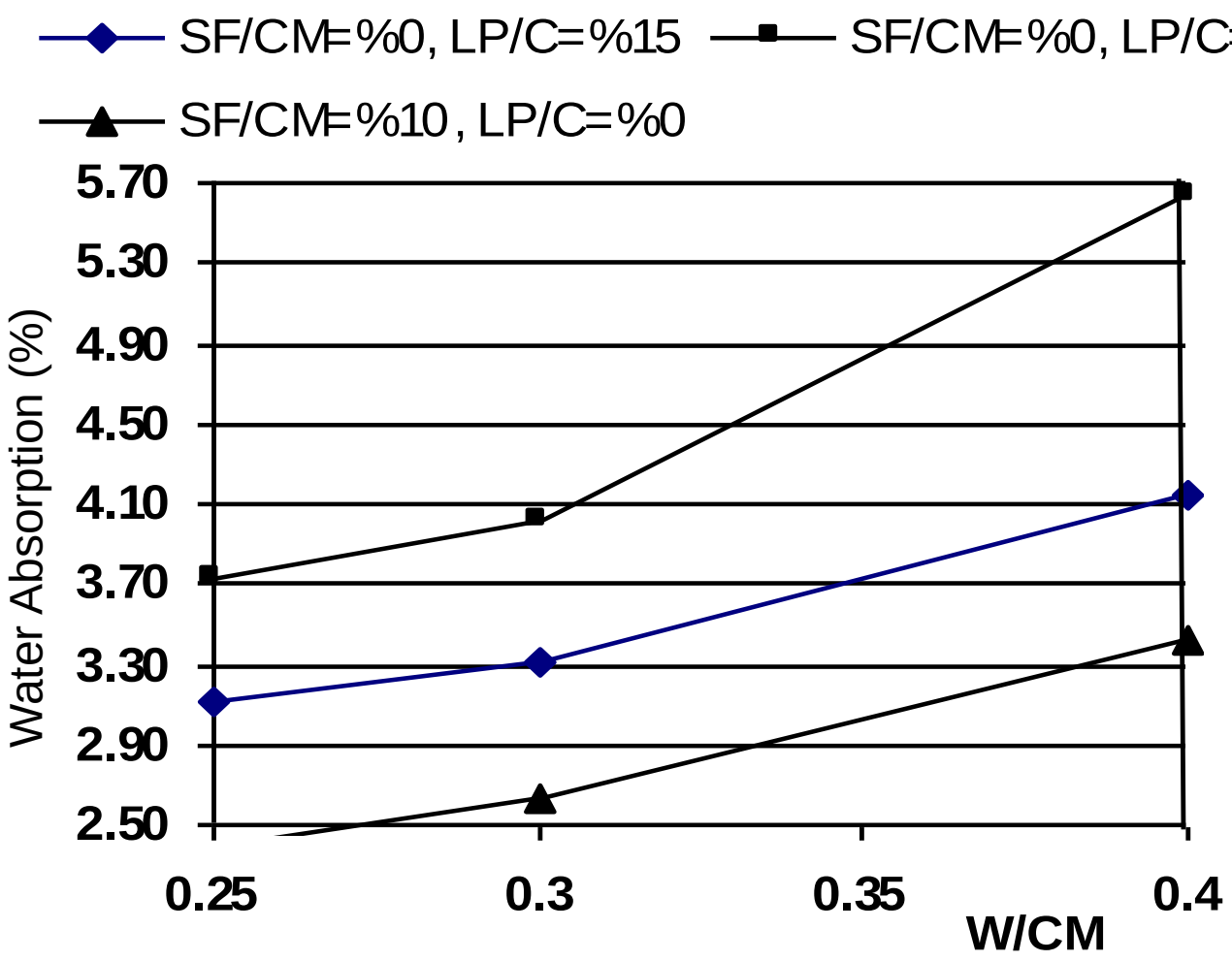
www.fppt.info

اثر LP/C بر مقاومت فشاری بتن

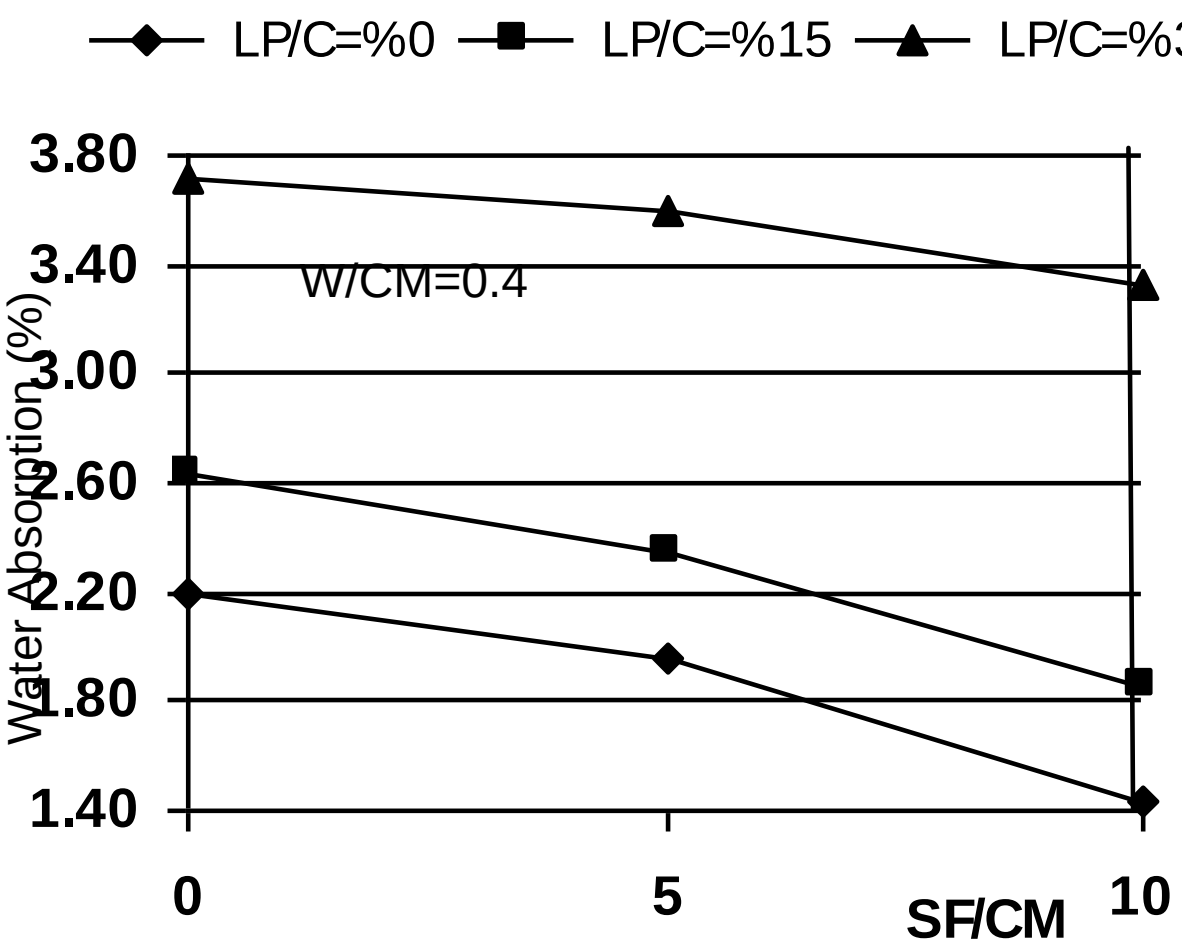


www.fppt.info

اثر W/CM بر میزان جذب آب

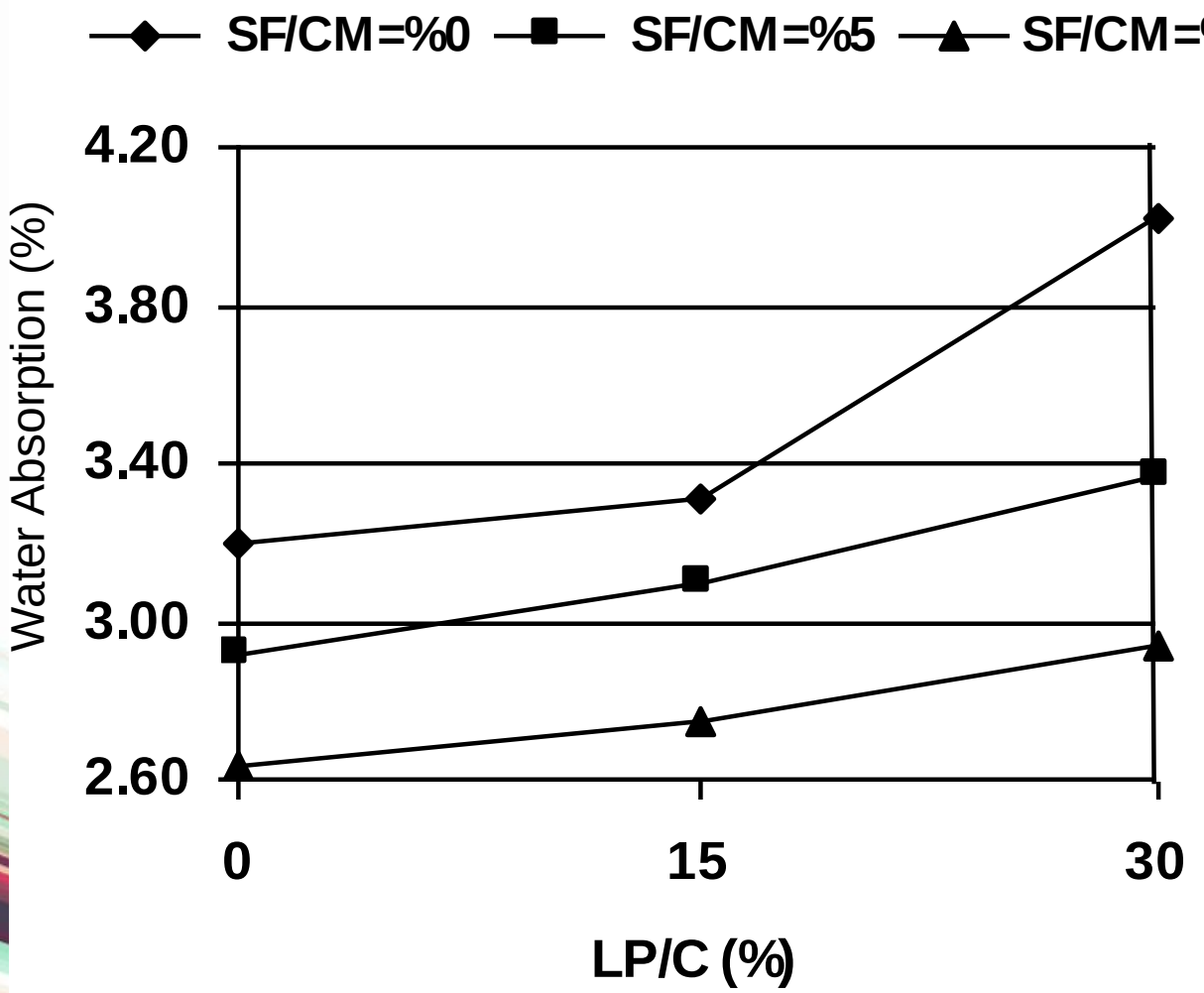


اثر SF/CM بر میزان جذب آب



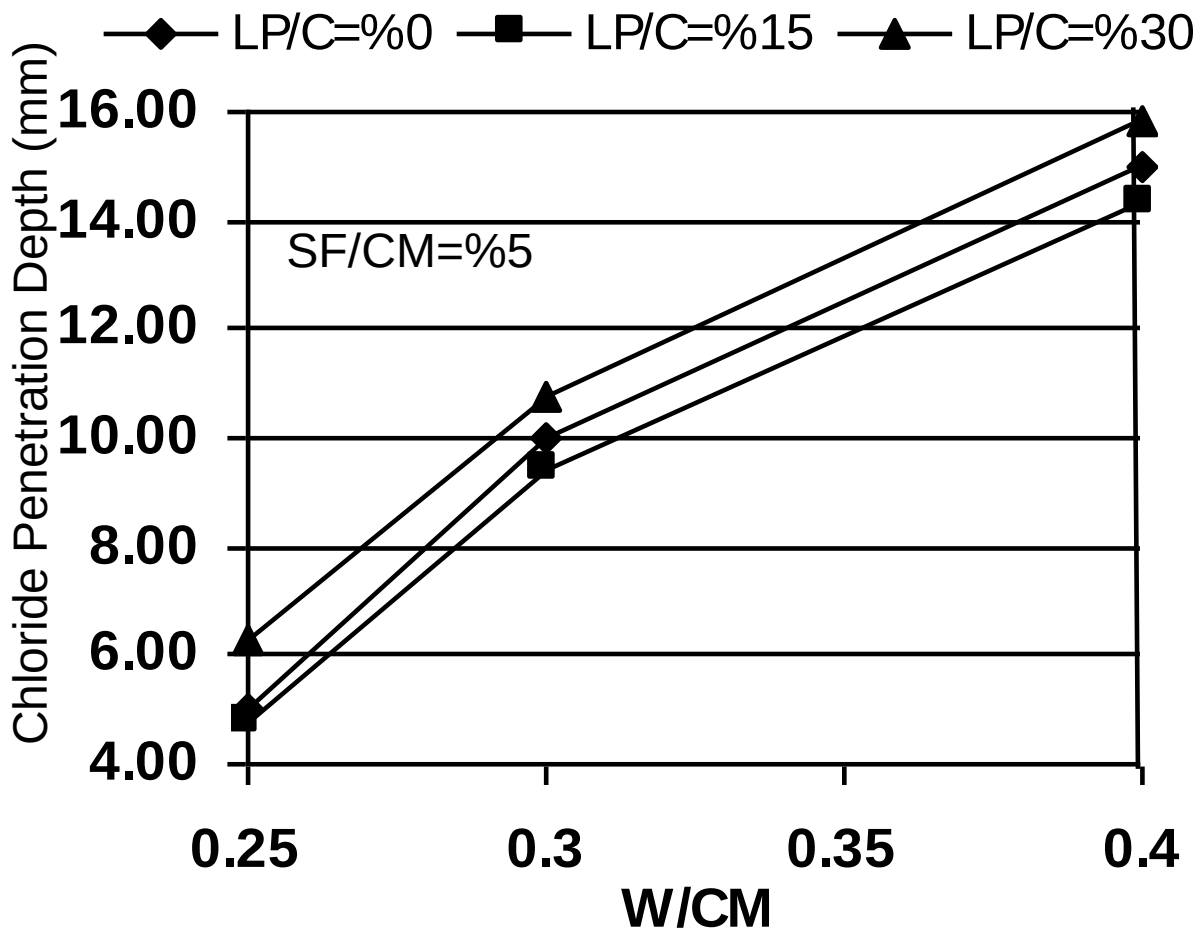
www.fppt.info

اثر LP/C بر میزان جذب آب



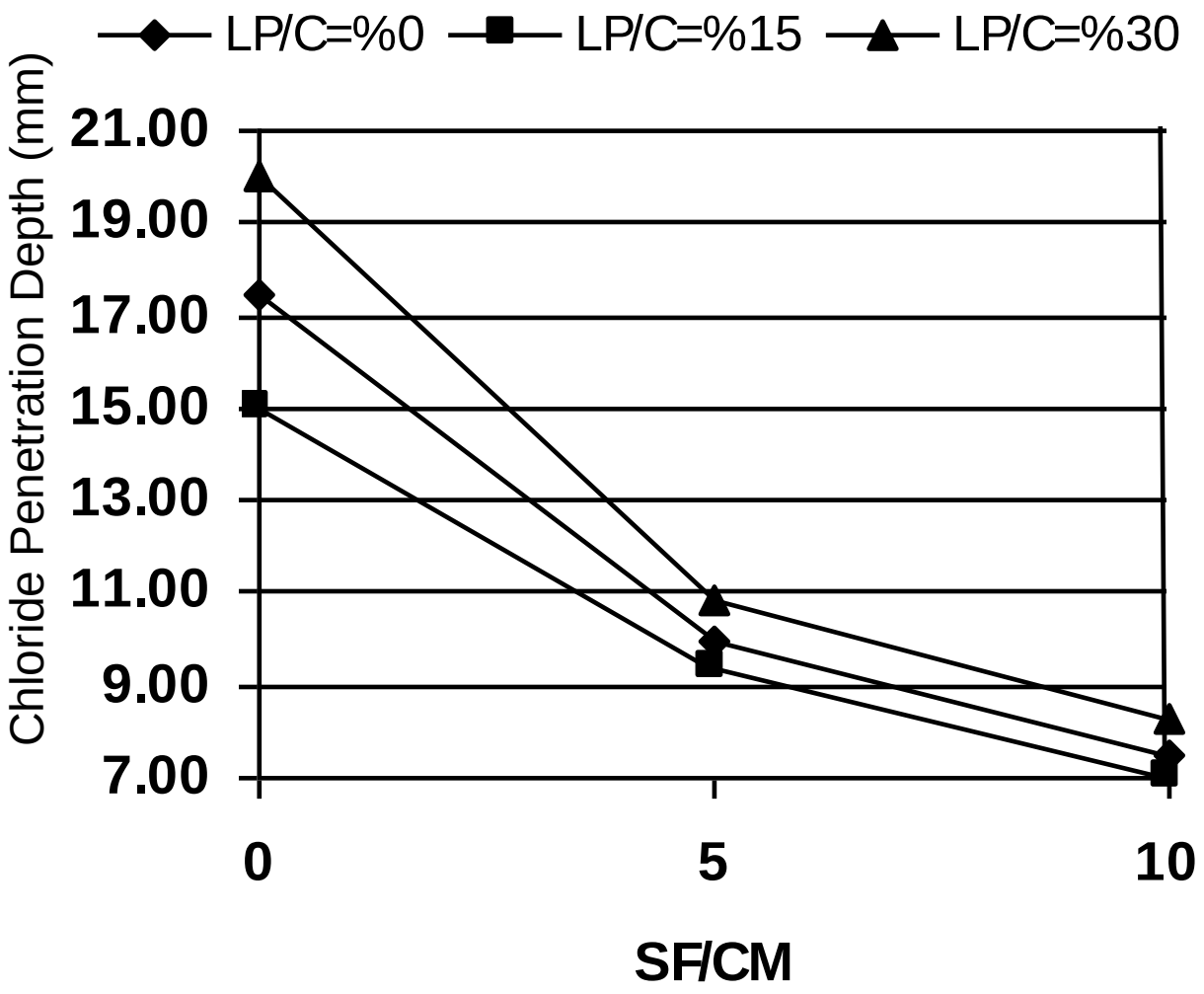
www.fppt.info

اثر W/CM بر میزان عمق نفوذ یون کلر



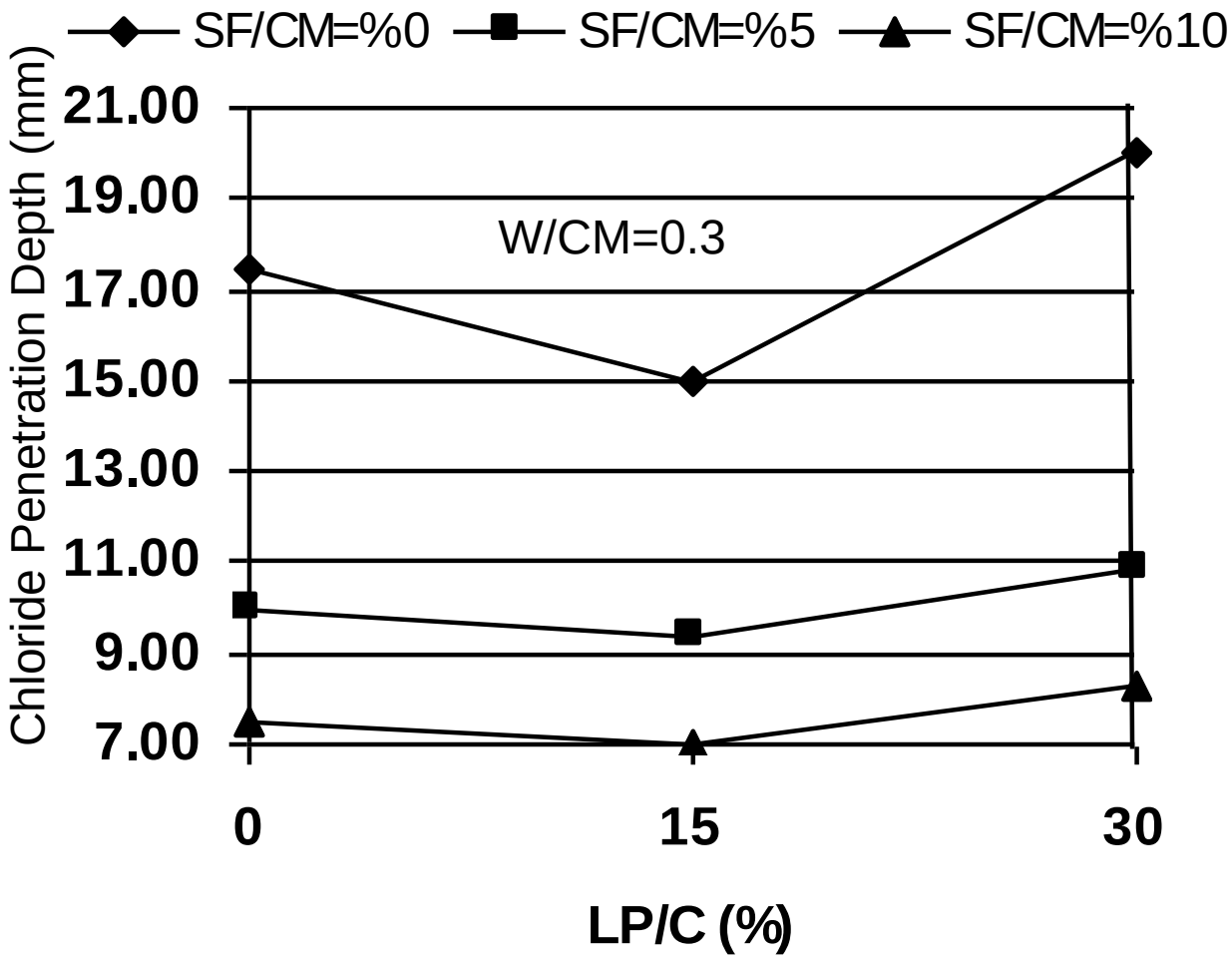
www.fppt.info

اثر SF/CM بر میزان عمق نفوذ یون کلر



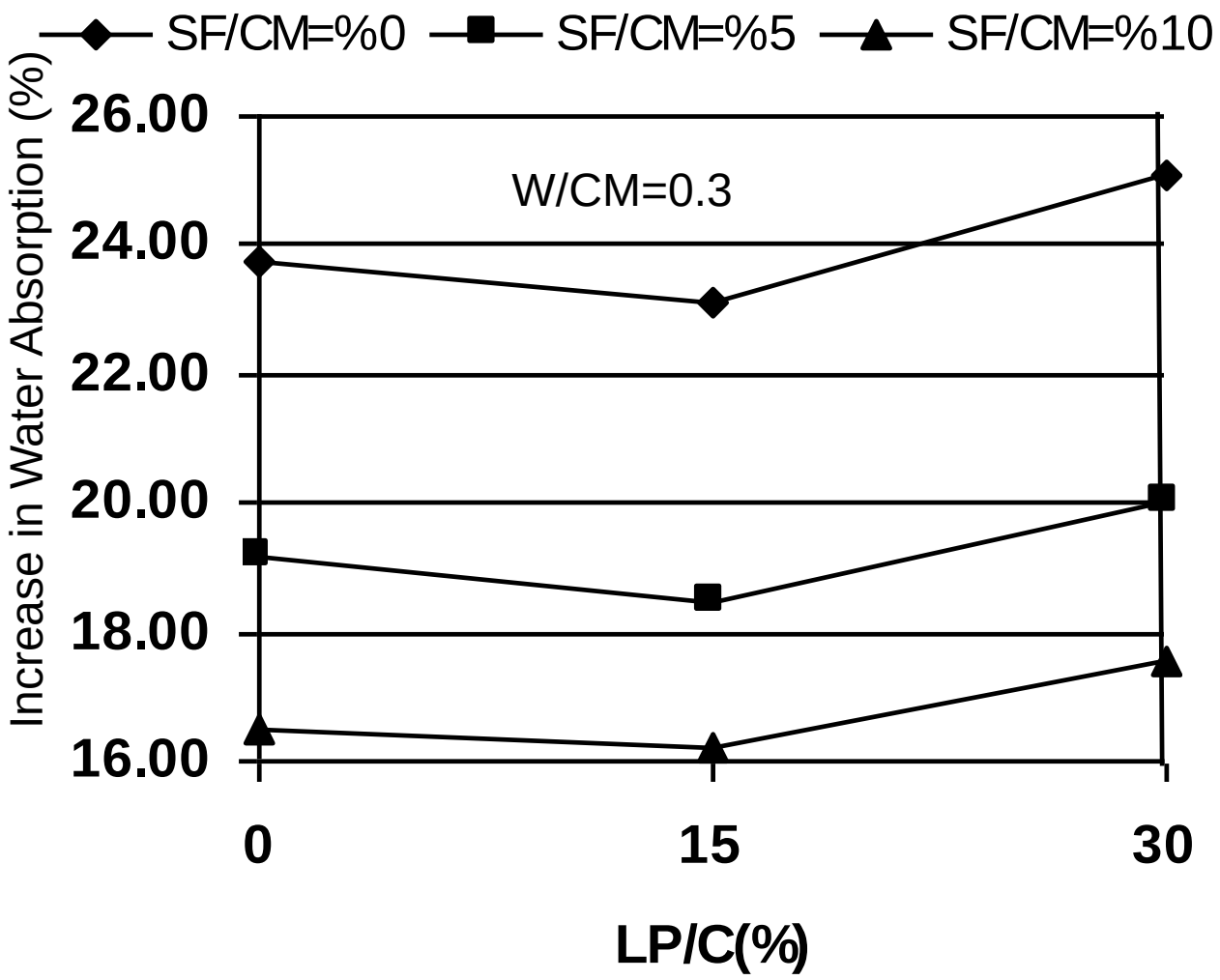
www.fppt.info

اثر LP/C بر میزان عمق نفوذ کلر

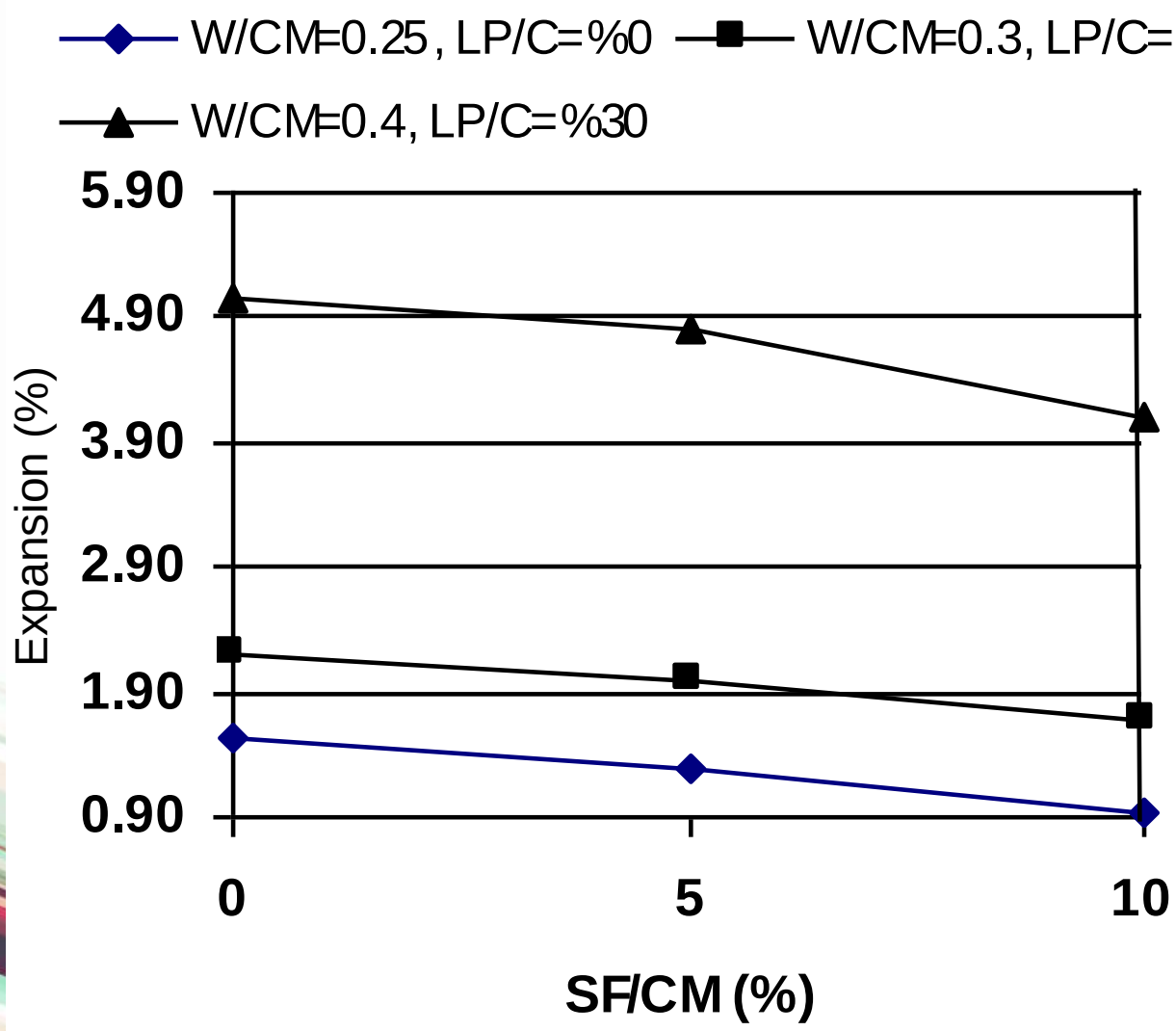


www.fppt.info

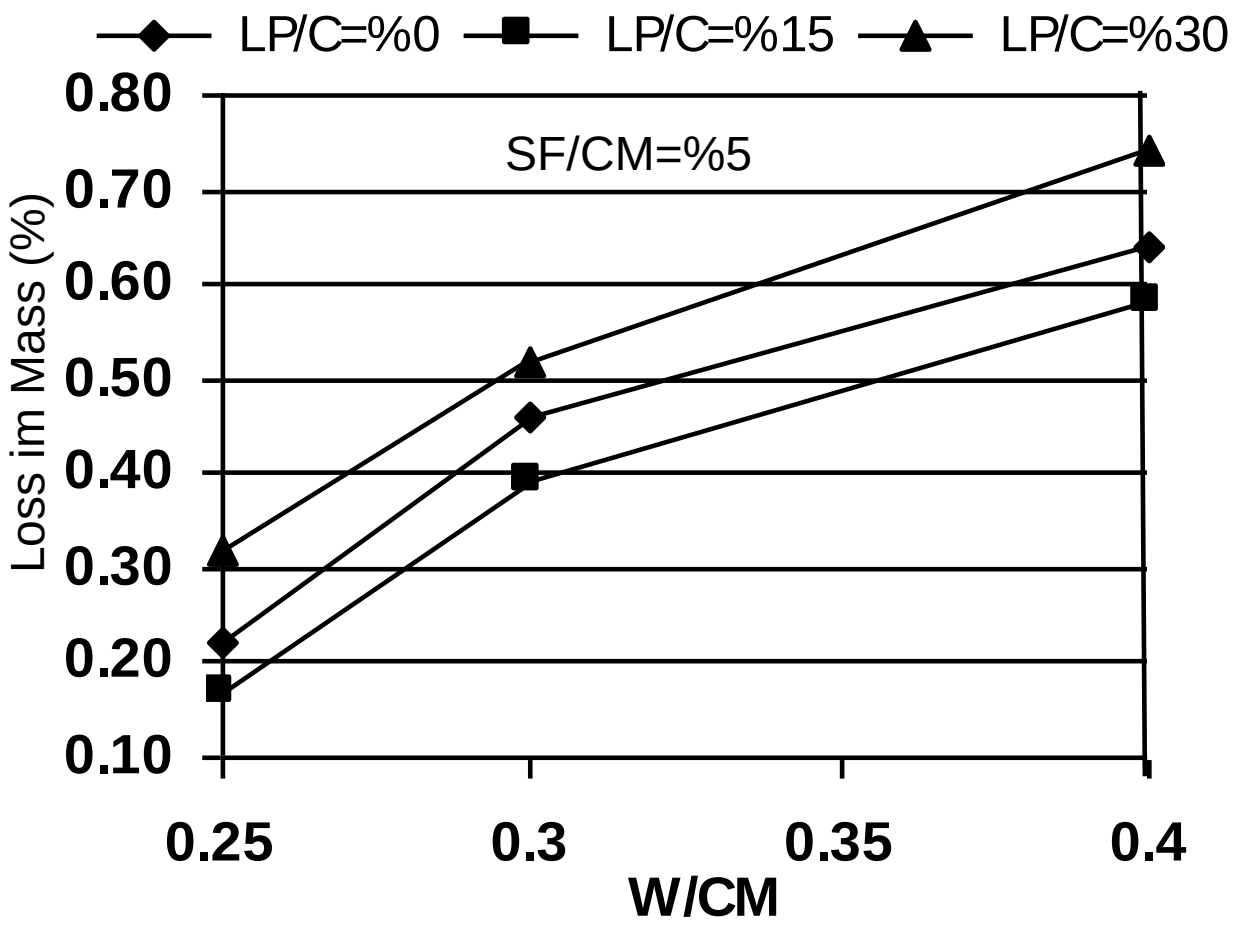
اثر LP/C بر میزان افزایش در میزان جذب آب



ww.fppt.info



www.fppt.info



www.fppt.info

Thank you for your attention!

www.fppt.info

میکرو سلیس کنکریٹ

Microsilica in Concrete

www.fppt.info